



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ ANALÝZA KLIMATICKÉ
KOMORY**

MATHEMATICAL-PHYSICAL ANALYSIS OF CLIMATIC CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ilia Repko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Ilia Repko

ID: 162926

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Matematicko-fyzikální analýza klimatické komory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte 3D objemový model klimatické komory v systému SolidWorks. Proved'te vysířování a nastavení matematického modelu v preprocesoru systému Ansys Fluent. Proved'te analýzu proudění a rozložení teploty v klimatické komoře pomocí metody konečných objemů s ohledem na rychlost ventilace. Vyhodnot'te vliv rychlosti proudění a tvaru komory na turbulenci vznikající v komoře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá matematicko-fyzikální analýzou klimatické komory. V teoretické části práce je popsána problematika klimatických komor, softwarové nástroje SolidWorks a ANSYS Fluent, základní rovnice popisující stav tekutin a turbulence. Cílem praktické části práce je vytvoření modelu klimatické komory CAD systému SolidWorks a simulace proudění a rozložení teploty prostřednictvím softwaru ANSYS Fluent. Závěrem práce jsou tyto výsledky analyzovány a vyhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klimatická komora, ANSYS Fluent, SolidWorks, Metoda konečných objemů.

ABSTRACT

This work deals with the mathematical and physical analysis of the climatic chambers. The theoretical part describes the issue of climatic chambers, software SolidWorks and ANSYS Fluent, basic equations describing fluid status and fluid turbulence. The practical part of the thesis is to create the model of climatic chamber in CAD system SolidWorks and simulation of flow and temperature distribution by ANSYS Fluent. At the end of the work the results are analyzed and evaluated.

KEYWORDS

Climatic chamber, ANSYS Fluent, SolidWorks, Finite element method.

REPKO, I. *Matematicko-fyzikální analýza klimatické komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Matematicko-fyzikální analýza klimatické komory* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych také chtěl poděkovat Bc. Janu Burianovi za jeho pomoc a rady o klimatické komoře Weiss.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	7
1 Klimatická komora	8
1.1 Konstrukce klimatické komory	8
1.2 Druhy klimatických komor	9
1.3 Ohřev vzduchu	13
1.4 Chlazení vzduchu	14
1.5 Vlhčení vzduchu	16
1.6 Odvlhčování vzduchu	18
1.7 Vzduchotechnika	18
2 Použité software	21
2.1 SolidWorks	21
2.2 ANSYS	22
3 Dynamika proudění	23
3.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře	23
3.2 Matematické modelování turbulentního proudění	26
3.3 Statické modely turbulence	29
4 Diskretizace, metoda konečných objemu a interpolační schémata	32
4.1 Diskretizace	32
4.2 Metoda konečných objemů	32
4.3 Numerické řešení výpočtu	33
4.4 Výpočetní síť	34
5 ANSYS Fluent – metody řešení úlohy	36
5.1 Pressure-based solver	36
5.2 Density-based solver	38
6 Experimentální část	40
6.1 Simulace v ANSYS Fluent	41
6.2 Měření teplotního profilu v klimatické komoře	57
7 Závěr	60

Literatura	61
Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
Seznam obrázků	65
Seznam příloh	68

ÚVOD

V dnešní době, díky rozvoji průmyslu, rostou také nároky na spolehlivost a životnost výrobků. Výrobce musí garantovat zákazníkovi jejich kvalitu a spolehlivost. Pro ověření životnosti a spolehlivosti výrobků existují zkušební zařízení, pomocí kterých lze provádět expozici vzorků za řízených tepelných a klimatických podmínek (teplota, vlhkost a jejich kombinace) a zkoušky vlivů prostředí – teplotní a klimatické zkoušky výrobků. Toto testovací zařízení se nazývá klimatická komora, která umožňuje přesně modelovat agresivní působení životního prostředí.

Pro řešení dané problematiky je nutné se seznámit s principy, na kterých fungují klimatické komory. Z tohoto důvodu se první část práce zabývá seznámením s klimatickými komorami. Jelikož se práce zabývá analýzou proudění vzduchu v pracovním prostoru, jsou v další části práce popsány modely proudění tekutin. Pro návrh i řešení problému bude využit software SolidWorks, v němž je vytvořen model pracovního prostoru klimatické komory a software ANSYS Fluent pro řešení analýzy rozložení klimatických podmínek v klimatické komoře.

1 KLIMATICKÁ KOMORA

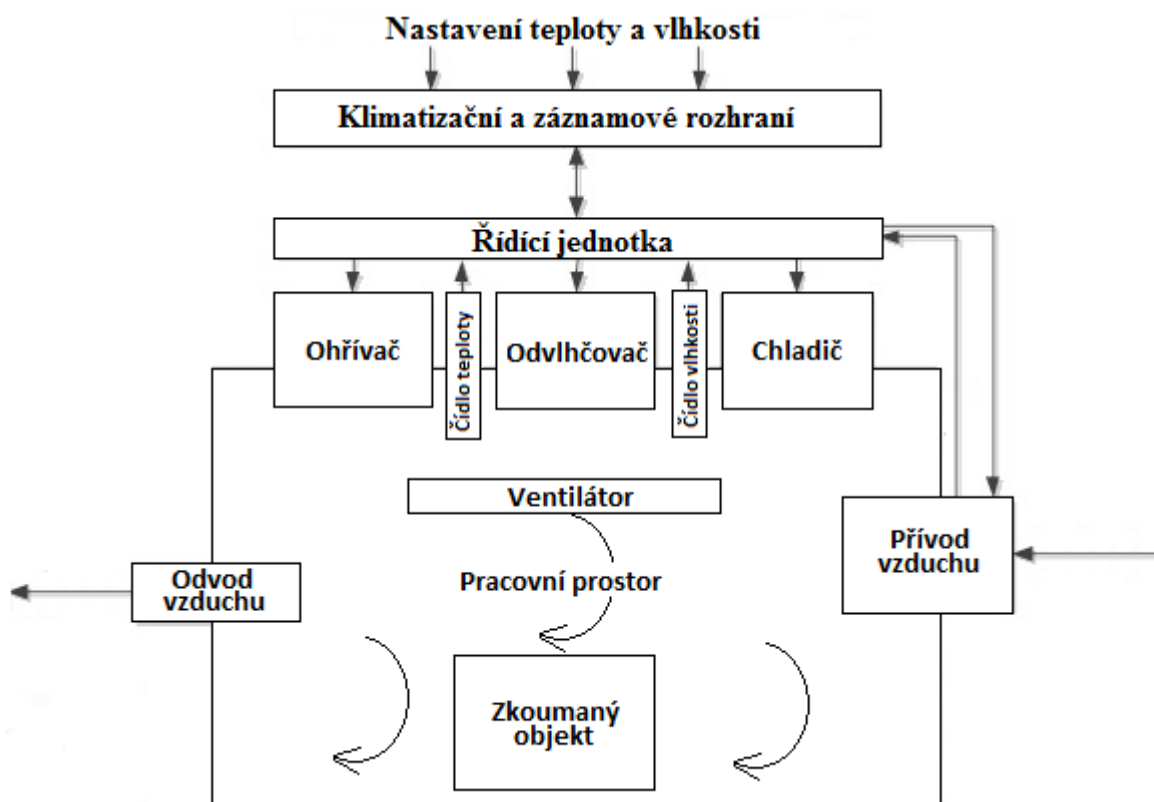
Klimatické testovací komory (anglicky „Climate chamber“) jsou zařízení, která umožňují přesně modelovat agresivní působení životního prostředí a která se používají k zajištění spolehlivosti průmyslových produktů, hlavně elektronických předmětů, které jsou vystaveny jednomu nebo více klimatickým parametrům po určitou dobu. Předpokládá se, že klimatické komory obsahují přesné měřicí přístroje pro kontrolu vlhkosti a teploty vzduchu. Často obsahují analogový výstup, digitální výstup nebo video display s výsledky testů.

Některé klimatické komory vystavují testované součásti teplotám a vlhkostem v daném rozsahu a také jejich změnám, jiné monitorují emise ze zařízení, jako spalovací motory, za přísně stanovených klimatických podmínek. Také se vyrábějí komory pro elektro-dynamické a mechanické zkoušky vibrací strojních zařízení. Dalším typem klimatických komor jsou komory pro měření koroze, které monitorují vliv proměnných podmínek, jako je teplota, vlhkost, solná mlha a dešťová mlha. [1]

1.1 Konstrukce klimatické komory

Většina klimatických komor má stejnou konstrukci a provedení. Skládají se ze zkušebního prostoru, ve kterém se provádějí klimatické zkoušky, zdrojů tepla (chladiče a ohříváče), zdrojů vlhkosti (zvlhčovače a odvlhčovače) a regulačního zařízení. Průtok vzduchu se řídí jednotlivými klimatickými jednotkami (chladič, ohříváč, zvlhčovač, odvlhčovač), které v komoře vyvolávají nucenou cirkulaci vzduchu. [2]

Na obrázku 1.1 je zobrazeno pracovní schéma klimatické komory umožňující řízenou změnu teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Z obrázku je zřejmé, že úprava vzduchu (chlazení/ohřev a vlhčení/odvlhčování) probíhá mimo pracovní prostor klimatické komory. Průtok vzduchu jednotlivými klimatickými jednotkami (chladič, ohříváč, zvlhčovač a odvlhčovače) je řízen pomocí ventilátorů, které vyvolávají nucenou cirkulaci vzduchu v komoře.



Obr. 1.1: Pracovní schéma klimatické komory

1.2 Druhy klimatických komor

1.2.1 Tepelná komora

Tepelné komory umožňují ověření vlivu zvýšené teploty vzduchu na zařízení a materiály. Tepelné komory, které mají přímé vytápění, jsou vhodné pouze pro jednoduché klimatické zkoušky s menšími výrobky, u nichž není třeba sledovat změny jejich vlastností přímo ve zkušebním klimatu. Tepelné komory, které obsahují zařízení na nucený oběh vzduchu, zajišťují stejnorodost prostředí v celém pracovním prostoru. [2]

1.2.2 Vlhkostní komora

Ve vlhkostních komorách je udržována stálá relativní vlhkost vzduchu při stálé teplotě. Vlhkostní komory umožňují relativně snadné ověření vlivu působení zvětšené vlhkosti vzduchu na materiály a technická zařízení. [2]

1.2.3 Stolová testovací komora

Stolové testovací komory se používají většinou v případech, pokud není k dispozici mnoho místa, nebo v případech, pokud se provádí klimatické zkoušky pro menší výrobky nebo malé materiálové vzorky. Stolní testovací komory umožňují regulaci vlhkosti a teploty. [1]

Příklad komerční komory:

Pro danou diplomovou práci byla zvolena klimatická komora od firmy Weiss. Modelová řada WK disponuje různými velikostmi zkušebního prostoru od 180 litrů až po 2000 litrů a vyrábí se v teplotním rozsahu od -40 °C či -70 °C až do +180 °C. Klimatické komory disponují vedle teplotního rozsahu ještě vlhkostním rozsahem od 10 % až do 98 % RH. Komora je vybaveny 8" dotykovým barevným displejem. Komory disponují chytrým regulačním systémem a lze je velice jednoduše připojit do sítě a vzdáleně kontrolovat či ovládat (i bez nutnosti speciálního softwaru). [3]

Parametry komory Weiss WK3-340/40:

Objem: 335 litrů

Rozsah teploty: -40 °C – 180 °C

Rozsah vlhkosti: 10 % – 90 % RH (relativní vlhkost vzduchu)

Materiál zkušebního prostoru: Nerezová ocel 1.4301 [21]



Obr. 1.2: Klimatická komora Weiss WK3-340/40 [3]

1.2.4 Teplotní komora šoková

Zkušební zařízení umožňující zjištění vlastností materiálů, chování výrobků a zařízení při rychlé změně okolních teplot. Teplotní šokové komory disponují několika (dvěma až třemi) zcela oddělenými samostatnými teplotními zónami. Rychlost přechodu mezi zónami je dána mechanickou změnou polohy mezi zkušebními prostory. [4]

1.2.5 Vibrační komora

Vibrační zkušební systémy umožňují provádět ověření životnosti výrobku při podmínkách jeho zamýšleného použití, odolnosti při jeho přepravě nebo aby se odhalily případné jiné závady pomocí vibrací nebo jejich kombinací s klimatickými změnami. [5]

1.2.6 Solné korozní komory

Tyto komory vytváří testovací prostředí s vysokým obsahem soli, s velmi vysokou vlhkostí a obvykle s rostoucí teplotou. Testované vzorky jsou tak vystaveny neustálému vlivu vysoce korozní solné mlhy. [6]



Obr. 1.3: Solná korozní komora [6]

1.2.7 Cyklické korozní komory (CCT)

Tento typ komor je schopen vytvářet různá korozní prostředí, která jsou následně kombinována a tvoří tak testovací cyklus, který simuluje reálné korozní podmínky. Standardně jsou komory CCT schopny produkovat solnou mlhu (stejně jako solné komory), sušení vzduchem (bez nebo s kontrolovanou vlhkostí) a prostředí s nasycenou vlhkostí. Existuje možnost vytvářet další typy testovacího prostředí, a to při použití některého volitelného příslušenství. Všechna prostředí mohou být programována tak, aby se postupně objevovala v testovací sekvenci v jakékoliv délce, při jakékoliv teplotě a pro jakýkoliv počet cyklů. [6]

1.2.8 Klimatická komora Walk-in

Tento druh klimatických komor slouží k testování velkých vzorků, případně vzorků uchycených do speciálních přípravků, které se nedají umístit do komory standardní velikosti. Často je těmito komorami řešena i otázka kapacit testování laboratoře, kdy pro velký počet vzorků, není možné využívat menší komory (nájezd pro paletový vozík apod. Tato zařízení jsou sestavována modulovým způsobem o objemu zkušebního prostoru 8, 12, 16 a 21 m³ [7]



Obr. 1.4: Walk-in komora [7]

1.2.9 Klimatická komora Drive-in

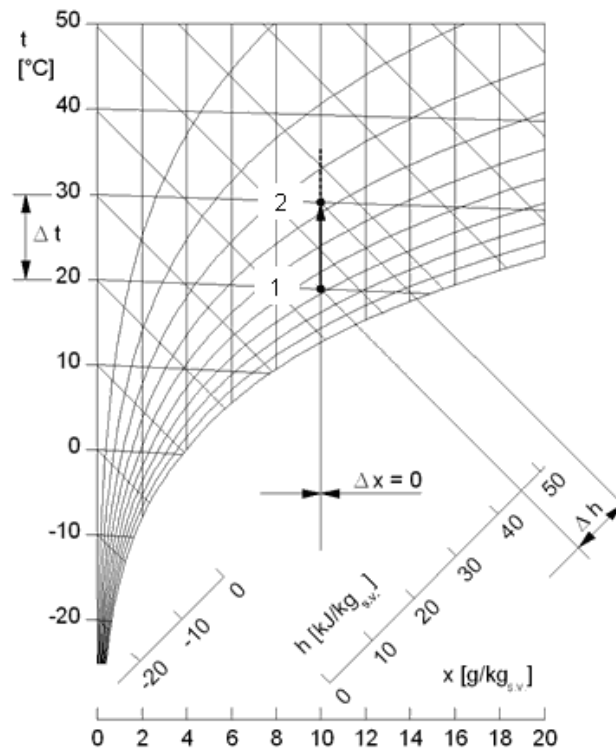
Tento typ komory je podobný Walk-in komoře, ale se používá pro testování vozidel. Pomocí této klimatické komory lze simulovat vliv teploty, vlhkosti, vibrace a slunečního záření. Jedná z takových komor je umístěna na FSI, VUT v Brně (Obr. 1.5). [1]



Obr. 1.5: Drive-in komora VUT v Brně FSI [15]

1.3 Ohřev vzduchu

Ohřev vzduchu probíhá za konstantní měrné vlhkosti (měrná vlhkost udává hmotnost vodní páry, která připadá na 1 kilogram suchého vzduchu). Zároveň se mění relativní vlhkost vzduchu, která s rostoucí teplotou klesá (relativní vlhkost udává poměr hmotnosti vodní páry obsažené ve vzduchu a hmotnosti vodní páry, kterou by měl stejný objem vzduchu při stejné teplotě a tlaku, kdyby byl vodní párou plně nasycen, tj. kdyby obsahoval sytou vodní páru). [8]



Obr. 1.6: Průběh změny stavu vzduchu při ohřevu vzduchu [8]

1.3.1 Zařízení pro ohřívání vzduchu

- Vodní ohříváče – jsou to jedno nebo víceřadé výměníky voda-vzduch, které se vyrábějí nejčastěji jako lamelové (měděné trubky s hliníkovými lamelami). Teplonosnou látkou je voda z otopné soustavy či samostatného zdroje. Může být využito i odpadního tepla.
- Parní ohříváče – uplatňují se tam, kde je k dispozici para. Používají se pro ohřev na velké teploty, jelikož mají velký výkon. Kvůli vyšším tlakům jsou více namáhány než vodní ohříváče, proto jsou většinou vyrobeny z ocelových trubek.
- Kondenzátorová jednotka chladivového systému – jedná se o tepelné čerpadlo (určené přímo pro vytápění), či odpadní teplo systému.
- Elektrické ohříváče – používají se především u malých zařízení, kde není potřeba mít velké výkony. Pro ohřev vzduchu se používají různé typy topných tyčí a spirál, jejichž tvar a parametry lze přizpůsobit dle potřeby. Regulace se provádí změnou napětí nebo proudu. Velkou výhodou elektrických ohříváčů je, že

nepotřebují protimrazovou ochranu.

- Plynové ohříváče. [8]

1.4 Chlazení vzduchu

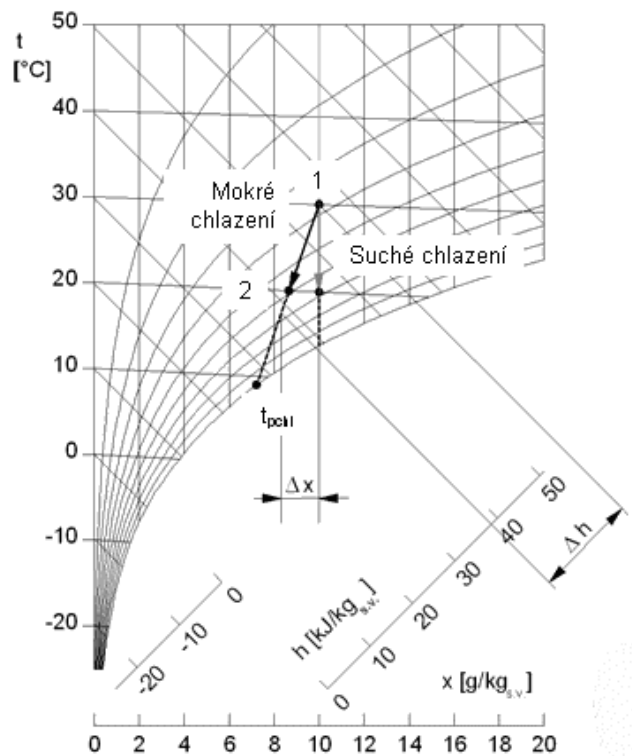
Chlazení vzduchu lze rozdělit do dvou kategorií podle jejich základního principu.

1.4.1 Mokrý chlazení

Dochází ke kondenzaci vodní páry, jelikož povrchová teplota chladiče je nižší než teplota rosného bodu. Vzhledem k tomu, že dochází ke kondenzaci vodní páry, tak se mění i měrná vlhkost vzduchu. [8]

1.4.2 Suché chlazení

Během suchého chlazení nedochází ke kondenzaci vodní páry, protože povrchová teplota výměníku je vyšší než teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu je teplota, při které vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100%), pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace. Teplota rosného bodu je různá pro různé absolutní vlhkosti (hmotnost vodní páry v objemové jednotce vlhkého vzduchu). Čím je vyšší absolutní vlhkost, tím je i vyšší teplota rosného bodu a naopak. Jelikož při suchém chlazení nedochází ke kondenzaci vodní páry, tak měrná vlhkost je během chlazení konstantní. [8]



Obr. 1.7: Průběh změny stavu vzduchu při chlazení [8]

1.4.3 Zařízení pro chlazení vzduchu

- Vodní chladiče – jsou to nejčastěji lamelové víceřadé výměníky voda-vzduch (měděné trubky s hliníkovými lamelami). Teplonosnou látkou je voda nebo nemrznoucí směs ze zdroje chladu (běžný teplotní spád 6/12 až 8/16).
- Chladivové systémy (přímý výparník) – jsou to výměníky chladivo-vzduch. Před přímým výparníkem je umístěn škrticí ventil, kapalné chladivo vstřikované do výparníku se odpařuje a přes stěny výměníku odebírá teplo proudu vzduchu. Hlavními výhodami přímých výparníků jsou:

- vyšší chladicí faktor zařízení,
- schopnost dosahovat nižších teplot vzduchu,
- absence vodního okruhu.

Nevýhody chladivových systémů jsou:

- riziko namrzání,
- obtížnější regulace,
- vyšší nároky na montáž.

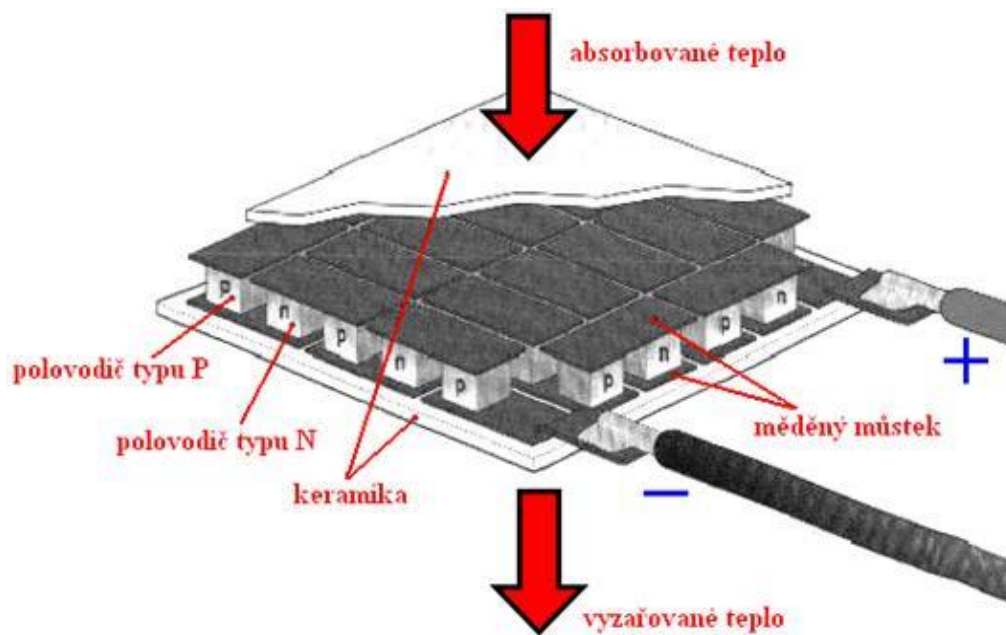
Kvůli kondenzaci je třeba zajistit odloučení (lapače kapek) a odvod kondenzátu (napojení přes zápachovou uzávěrku do kanalizace) [9]

1.4.4 Peltierův článek

Peltierové články se používají v případech, když pro chlazení prostoru o malém objemu je dostačující malý chladicí výkon chladiče, a použití jiných chladičů je komplikované a neekonomické. Tento chladič pracuje na stejném principu jako všechny ostatní chladiče, a to tak, že přemísťuje teplo z jednoho místa na druhé (ze studené strany na teplou). Mezi výhody chlazení pomocí Peltierových článků patří absolutně tichý provoz, snadná regulace výkonu, téměř neomezená životnost chladiče. Další výhodou je snadná a rychlá změna z chlazení na topení (změnou směru průchodu stejnosměrného proudu). Nevýhodou tohoto chlazení je přehřívání, vyšší spotřeba elektrické energie a nižší účinnost chlazení, proto se nevyužívají pro chlazení, kde je potřeba vyšších výkonů.

Peltierové články využívají Peltierova jevu. Peltierův jev je jev, při kterém průchodem elektrického proudu oběma kovy (a tedy i jejich spoji) se vytvoří teplotní rozdíl mezi oběma spoji. V závislosti na polaritě přiloženého napětí se bude jeden spoj ohřívat a druhý ochlazovat.

Základním polovodičovým materiálem pro výrobu Peltierových článků jsou bizmut-telluridy, tj. termální systémy Bi-Te-Se (pro výrobu polovodiče typu N) a Bi-Sb-Te (pro výrobu polovodiče typu P). Tyto materiály mají výhodné termoelektrické vlastnosti: mají malý měrný elektrický odpor a malý součinitel tepelné vodivosti. Spojovací můstky jsou vyráběny většinou z mědi, protože měď má malý měrný elektrický odpor a snadno se k ní pájí další součástky. Její nevýhodou je její případná difúze do materiálu polovodiče, což by zhoršovalo jeho vlastnosti. V místě styku můstku a polovodiče vzniká i nežádoucí přechodový odpor, který může značně nepříznivě ovlivnit dosažitelný chladicí výkon článku a maximální dosažitelný teplotní rozdíl obou spojek. [10]



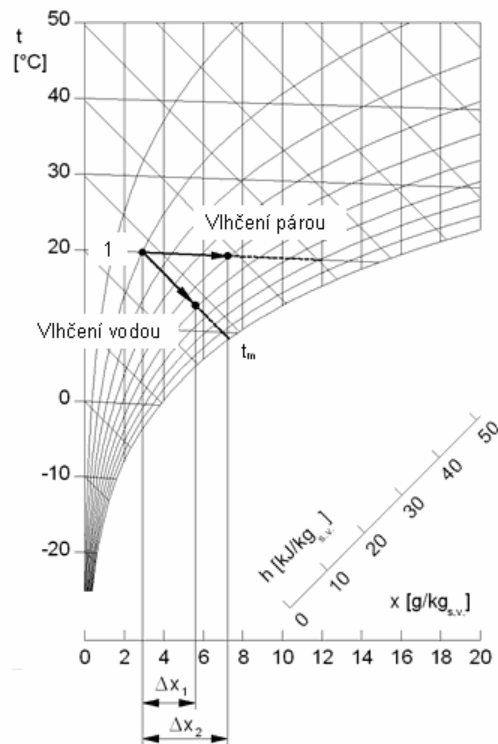
Obr. 1.8: Schématické znázornění Petlierova článku [10]

1.5 Vlhčení vzduchu

Vlhčení vzduchu lze provádět dvěma způsoby, a to buď vodou nebo parou.

Směr změny stavu vzduchu při vlhčení parou probíhá za konstantní teploty (ve skutečnosti se vzduch mírně ohřívá, ale v praxi je tato změna zanedbatelná).

Směr změny stavu vzduchu při vlhčení vodou o teplotě t_m probíhá za konstantní entalpie – jedná se o adiabatické chlazení, $h = konst.$ (obrázek 5). Pokud měrná vlhkost vzduchu roste, tak teplota vzduchu během procesu klesá. Tento případ lze v některých případech využít i k chlazení. [8]



Obr. 1.9: Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vzduchu [8]

1.5.1 Zařízení pro vlhčení vzduchu

- Parní zvlhčovače vzduchu. Jsou to jednoduché a regulovatelné zvlhčování vzduchu vodní parou, která téměř neovlivňuje teplotu vzduchu. Ve větších klimatizačních zařízeních pára je přiváděna z centrálního zdroje (parního kotle), v menších klimatizačních zařízeních je pára vyráběna přímo (elektrický ohřev). Parní zvlhčovač vzduchu se skládá se z redukčního ventilu a z trubky s tryskami, pomocí kterých se pára vhání do zvlhčovací komory klimatizačního zařízení nebo přímo do vzduchovodu. Pára se rozpouští ve vzduchu, z tohoto hlediska se jedná o efektivní vlhčení, ale nevýhodou je vysoká spotřeba elektrické energie. [1]
- Ultrazvukové zvlhčovače vzduchu. Hlavním komponentem ultrazvukového zvlhčovače je zvlhčovací jednotka. Ze zvlhčovací jednotky se voda uvolňuje v podobě mikroskopických kapek (o velikosti 1 až 3 μm) pomocí ultrazvukových vibrací, a následovně ventilační systém uvolněné mikroskopické kapky vhání do zvlhčovaného prostoru. Tento typ zvlhčovačů má schopnost dosáhnout nejvyšších zvlhčovacích výkonů mezi zvlhčovači při nízké spotřebě energie, ale jsou náchylné na tvrdou vodu (je potřeba mít zařízení na změkčování vody). Pokud zvlhčovač neobsahuje bakteriální zařízení, je třeba měnit starou vodu za novou, aby se případné bakterie obsažené ve staré vodě nedostaly do zvlhčovaného prostoru. [1]
- Zvlhčovače vzduchu se studeným odparem. K odparu dochází pomocí filtračního tělesa (buď rotující kotouč – diskový zvlhčovač, nebo filtrační kazeta – deskový zvlhčovač), které nasává vodu z nádržky. Voda se z něj odpařuje a za pomoci ventilátoru se vhání do zvlhčovaného prostoru. Tento typ zvlhčovače umožňuje částečné čištění vzduchu (jen od větších prachových částic a některých pylů).

Jedná se o nejpřirozenější princip zvlhčování, a tak nemůže dojít k převlhčení vzduchu. Při zanedbaném čištění dochází ke vzniku bakterií v nádržce a jejich následné rozptýlení ve zvlhčovaném prostoru, kvůli je lepší, pokud zvlhčovač obsahuje antibakteriální zařízení. [1]

1.6 Odvlhčování vzduchu

Odvlhčení vzduchu se provádí dvěma způsoby. Buď kombinací mokrého chlazení a následného ohřevu, nebo využitím sorpčních výměníků. Nevýhodou kondenzačního odvlhčování je vysoká spotřeba energie. [8]

1.6.1 Zařízení pro odvlhčování vzduchu

- Kondenzační odvlhčovače. Vlhký vzduch je nasáván pomocí ventilátoru přes výparník, kde je ochlazen pod rosný bod, a proto kondenzuje na povrchu výparníku. Kondenzát odkapává do kondenzační vany, ze které dále stéká do umístěného přímo pod kondenzační vanou zásobníku. Kondenzát se automaticky odčerpává ze zásobníku pomocí čerpadla. Takto odvlhčený a ochlazený vzduch potom prochází kondenzátorem, kde je ohříván a následně vháněn zpět do vysušovaného prostoru. Teplota odvlhčeného vzduchu je vyšší než teplota vzduchu v odvlhčovaném prostoru. Odvlhčování vzduchu o nižší teplotě než 10 °C není tímto kondenzačním způsobem ekonomické z důvodu snížení chladicího výkonu (sníží se rozdíl teplot mezi vzduchem a výparníkem). [1]
- Adsorpční odvlhčovače. Vlhký vzduch je nasáván pomocí ventilátoru přes filtr a je veden přes rotující sorpční kolo, které na sebe váže vodu obsaženou ve vzduchu (dochází k adsorpci vody). Nejčastěji se používá silikagel, jako materiál sorpčního kola, který na sebe váže vodu. Aby tento princip vysoušení mohl fungovat po delší dobu, je třeba sorpční těleso regenerovat, aby nebyla vyčerpána jeho sorpční kapacita. Regenerace probíhá současně s adsorpcí, tedy se jedná o nepřetržité odvlhčování. Regenerace probíhá pomocí horkého vzduchu, který na sebe váže vlhkost obsaženou v sorpčním kole. Regenerační vzduch je nasáván z vnějšího prostředí a také je do něj následně odváděn. Adsorpční vysoušeč může pracovat i za nízkých teplot a dosahovat při nich nízké hodnoty vlhkosti vzduchu. [1]

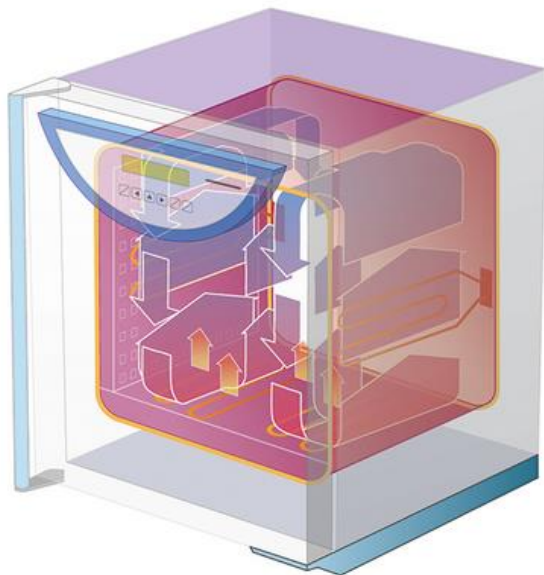
1.7 Vzduchotechnika

Vzduchotechnika zajišťuje cirkulaci vzduchu (přívod a odvod vzduchu) v pracovním prostoru. Používají se ventilátory, které slouží k dopravě vzduchu do požadovaného prostoru. Podle směru průtoku plynu ventilátorem, můžeme je rozdělit na axiální, diagonální a diametrální. Pro jejich pohon se většinou používá elektromotor. Ventilátor je spojen s motorem přes spojku nebo převod (nejčastěji řemenový), u malých ventilátorů je spojen přímo s hřídelí elektromotoru.

1.7.1 Komory s přirozenou cirkulací vzduchu

Princip přirozené cirkulace vzduchu je založen na jemném gravitačním proudění

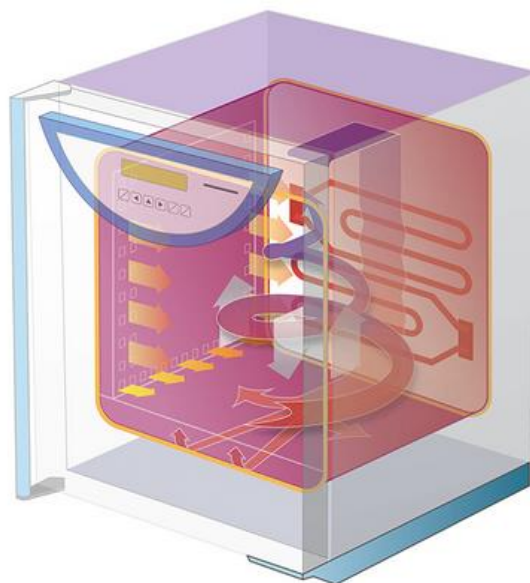
vzduchu v elektricky vyhřívané komoře přístroje. Dvouplášťová konstrukce komory spolu s řídicí automatikou zajišťují homogenní rozložení teploty v komoře, přesný průběh procesů a krátké časy zotavení (návratu na zvolenou teplotu) po otevření dveří. Je vhodná pro jednoduchý proces sušení a ohřevu běžných materiálů. [11]



Obr. 1.10: Komora s přirozenou cirkulací vzduchu [11]

1.7.2 Komory s nucenou cirkulací vzduchu

Princip nucené cirkulace vzduchu je založen na jemném proudění vzduchu pomocí ventilátoru v elektricky vyhřívané komoře přístroje. Termodynamický systém – tepelného šroubu – zajišťuje vytvoření homogenního proudu vzduchu spirálovitě stoupajícího uvnitř pracovní komory. Přirozeným temperováním od spodu nahoru tento proces simuluje přírodní děje a zajišťuje optimální prohřívání materiálů i vysokou prostorovou přesnost teploty v komoře při minimální spotřebě energie. Pomocí systému vedení vzduchu v zadních a bočních stěnách zajišťují homogenní směsici teplého vzduchu a tím exaktní teplotní profil. [11]



Obr. 1.11: Komora s nucenou cirkulací vzduchu [11]

1.7.3 Komory s vakuem

Princip činnosti je založen na principu sušení ve vakuu s možností vytěsnění vzduchu v komoře inertním plynem. Elektricky vyhřívaná nerezová komora přístroje umožňuje přesné vyhřívání a sušení vzorků až do konstantní hmotnosti. [11]

2 POUŽITÉ SOFTWARE

2.1 SolidWorks

Model klimatické komory byl vytvořen v systému SolidWorks (obr. 2.1). Tento strojírenský 3D CAD software nabízí nejen výkonné objemové i plošné modelování postavené na jádře Parasolid®, ale i práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

SolidWorks obsahuje celou škálu základních, specializovaných i rozšiřujících nástrojů – od elementárních nástrojů pro vytváření objemových těl a ploch, přes nástroje pro analýzu (úkosů, podřezání, úhlových odchylek, křivosti atd.), produktivní nástroje (pole a zrcadlení prvků, dílů i komponentů, vícetělové prostředí, variantní modelování a tabulky variant, automatické a pokročilé tvarové funkce, podpora přechodu ze 2D do 3D, knihovny materiálů, realistické zobrazení atd.) až po specializované návrhářské nástroje.

V sestavách software umožňuje rychlé vazbení mezi jednotlivými modely, modelování v sestavě, pokročilou kinematiku a také poloautomatické vytváření rozhozených pohledů. Největší výhodou daného systému lze vidět až při práci s velkými sestavami a zejména pak při vytváření výkresů z těchto velkých sestav. V takovýchto výkresech se všechny pohledy generují zcela automaticky, stejně jako například opozicování či vytvoření kusovníku.

Další výhodou SolidWorks je standardně velice vysoký výkon i na běžném hardware – pro SolidWorks není třeba pořizovat výkonový počítač za mnoho desítek či stovek tisíc korun.

SolidWorks poskytuje výkon pro rychlou a snadnou práci s velkými sestavami obsahující desítky tisíců komponentů – a to bez nutnosti načítat všechny tyto komponenty do paměti. Během práce v sestavě systém se přímo odkazuje na ostatní komponenty, spravuje vazby, vytváří nové a upravuje stávající komponenty.

SolidWorks má k dispozici intuitivní a lehce ovladatelné modelovací nástroje. Modely lze vytvářet pomocí rotací, vysunutí, spojení profilů, tažení po křivkách, tenkostěnných operací a skořepin, zaoblení, normalizovaných děr, pokročilých polí atd. Je možné využít všech výhod práce ve vícetělovém prostředí, včetně booleovských operací, konturových skic, posouvání, kopírování a pole těl atd.

Pro náročné úlohy jsou nástroje pro analýzu úkosů, podřezání, tloušťky stěn, úhlových odchylek a křivosti ploch a splajnů stejně jako pokročilé funkce a nastavení u nástrojů jako je spojení profilů či tažení po křivce.

SolidWorks zahrnuje nástroje pro kinematiku: dynamickou i statickou detekci kolizí, dynamickou detekci vůlí, kontaktní přenos pohybu, kinematické vazby či celé pohybové simulace.

SolidWorks má úplnou asociativitu: v případě vzniku jakákoliv změny výkresu, tato změna okamžitě se promítne do modelu dílu či sestavy. Všechna data vytvořená v SolidWorks jsou vždy plně editovatelná a asociativita je zaručena vždy za všech okolností mezi všemi dokumenty SolidWorks (díly, sestavy a výkresy). [12]

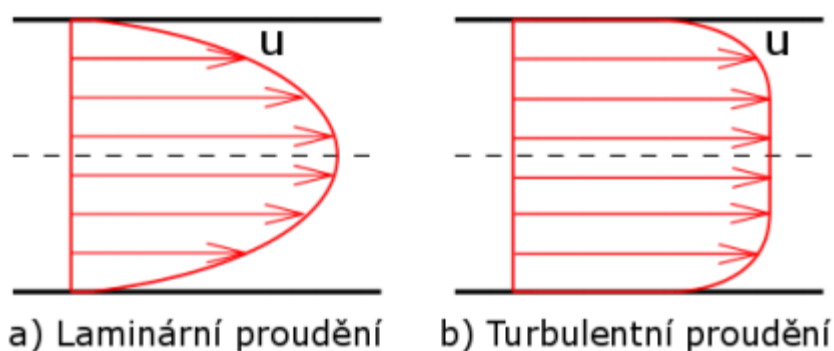
2.2 ANSYS

Program Fluent je nástroj sloužící pro analýzy a řešení problematiky přenosu tepla, proudění, spalování nebo chemickým reakcím. Systém má k dispozici nástroje, které umožňují vytvářet výpočetní oblasti na základě geometrických dat, která získávají z CAD systému. Pomocí Ansys Fluent lze řešit úlohy s vnitřním a vnějším obtékáním nebo laminárním a turbulentním prouděním. Velkou výhodou je možnost osově symetrických 2D výpočtů, to znamená využít přímo 2D typy prvků a úlohu řešit s menším počtem rovnic. [13]

3 DYNAMIKA PROUDĚNÍ

Proudění skutečných kapalin lze rozdělit na laminární a turbulentní proudění. Pro ustálené laminární proudění platí, že částice se pohybují po paralelních drahách (trajektoriích), jednotlivé vrstvy se navzájem nemísí. Pro turbulentní proudění je typické, že trajektorie částic jsou nepravidelné a nastává intenzivní promíchávání proudící tekutiny. Během promíchávání tekutiny dochází k výměně kinetické energie mezi částicemi a rychlosti částic se tak po průřezu vyrovnávají. Při přemístění částic dochází také ke změně hybnosti, což způsobuje nárůst odporu proti proudění [14].

Laminární a turbulentní proudění se liší rychlostním profilem a velikostí hydraulických ztrát. Rychlostní profil laminárního proudění má tvar rotačního paraboloidu, u turbulentního proudění se více podobá obdélníku. Rychlostní profily pro proudění v potrubí jsou zobrazeny na obrázku 3.1:



Obr. 3.1: Rychlostní profily pro proudění [14]

3.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře

Výpočty probíhaly v systému ANSYS Fluent, který řeší systém tří parciálních diferenciálních rovnic doplněný o stavovou rovnici. Jedná se o trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny s přívodem tepla.

Základní rovnice jsou:

- zákon zachování hmotnosti (rovnice kontinuity),
- zákon zachování pohybu (Eulerovy rovnice),
- zákon zachování energie (Bernoulliho rovnice) doplněné rovnicí stavu.

Rovnice spojitosti vyjadřující zákon zachování hmotnosti, ve tvaru

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \text{ složka } i = 1, 2, 3. \quad (3.1)$$

Stokes – Navierova rovnice vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, nabývá tvaru

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{index } j = 1, 2, 3. \quad (3.2)$$

Rovnice energie, která vyjadřuje zákon zachování energií pro stlačitelnou tekutinu:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3.3)$$

$$E = e + \frac{v^2}{2}. \quad (3.4)$$

Rovnice stavu pro ideální plyn:

$$\rho = \frac{p}{RT}. \quad (3.5)$$

V uvedených rovnicích u je rychlost tekutiny, p je tlak tekutiny, ρ je hustota tekutiny, T je teplota tekutiny, e je vnitřní energie, S_i jsou vnější hmotnostní síly, které působí na jednotku hmotnosti (kupř. tíhová, odstředivá), Q_H je přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu, q_i je tok tepla difusní, τ_{ik} je tensor vazkových napětí a ij jsou indexy u veličin a udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).

Výše uvedené základní rovnice pro řešení proudění stlačitelné tekutiny s uvažováním tření, vyjadřující zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie tvoří systém parciálních diferenciálních rovnic a lze je vyjádřit vhodným zápisem v obecné konzervativní formě,

$$\frac{\partial (\rho \zeta)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \zeta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right) + S_\zeta, \quad (3.6)$$

kde ζ je proměnná a členy na pravé straně diferenciální rovnice jsou postupně konvektivní člen, difúzní člen a zdrojový člen.

Pro zákon zachování hmotnosti platí pro proměnnou $\zeta = 1$ a členy na pravé straně rovnice obsahují pouze konvektivní člen. Tedy

$$\zeta = 1, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i), \quad \text{složka } i = 1, 2, 3. \quad (3.7)$$

Pro zákon zachování hybnosti platí pro proměnnou $\zeta = u_i$ a na pravé straně rovnice jsou konvektivní člen, difúzní člen, zdrojový člen a tlak. Tedy

$$\zeta = u_i, \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{kde index } j = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

Pro zákon zachování energie platí pro proměnnou $\zeta = E + p$, $E = e + u^2/2$, kde e je vnitřní energie a pravá strana rovnice obsahuje konvektivní člen, difúzní člen, zdrojový člen a turbulentní viskozitu μ_t a rychlostí disipace ε . Tedy

$$\zeta = E, \quad \frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3.9)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}, \quad (3.10)$$

V případě, že člen ζ představuje skalární veličinu, jedná se o lineární rovnici druhého řádu, ale pokud ζ představuje složku rychlosti, tehdy se jedná o nelineární rovnici druhého řádu. Převládá-li vliv difúzního členu, jde o rovnice eliptické, pokud převládá vliv konvektivního transportu, jedná se o rovnice parabolické a vliv významných tlakových změn popisují rovnice hyperbolické.

Tenzor vazkových napětí pro Newtonské tekutiny je definován vztahem:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (3.11)$$

Reynoldsova napětí tvoří tenzor o devíti členech, přitom nezávislých je šest, kvůli tomu je i rovnic šest, které tvoří rozsáhlý systém diferenciálních rovnic obtížně řešitelných. Proto je věnována pozornost teoriím, které se zabývají jednodušším vyjádřením Reynoldsových napětí v rovnici (tzv. modely turbulence).

S využitím Boussinesquovy hypotézy nabývá tenzor Reynoldsových vazkových napětí upravený tvar, ve kterém je zavedena je turbulentní viskozita μ_t a turbulentní kinetická energie k . V rámci modelu k - ε turbulence, který je založený na dvou základních vlastnostech turbulence, a to na turbulentní kinetické energii k a turbulentní disipaci ε , lze určit turbulentní viskozita μ_t . Pro určení turbulentní kinetické energie k a rychlosti disipace ε jsou pak použity dvě transportní rovnice (dvourovnicový k - ε model, kterým se základní rovnice popisující proudění vazké tekutiny doplňují o dvě parciální diferenciální rovnice).

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (3.12)$$

Zde δ_{ij} je Kroneckerova delta funkce (je rovna jedné pro $i = j$ a rovna nule pro ostatní případy), μ je dynamická viskozita, (pro laminární proudění platí $\mu_t = k = 0$).

V rámci modelu k - ε turbulence, který je založený na dvou základních vlastnostech turbulence, a to na turbulentní kinetické energii k a turbulentní disipaci ε , lze určit turbulentní viskozita μ_t

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (3.13)$$

Zde f_μ je faktor turbulentní viskozity, který je definován vztahem:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025 R_y)]^p \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_T} \right), \quad k \text{ de} \quad R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}. \quad (3.14)$$

V rovnici je vzdálenost od stěny označena y .

Pro určení turbulentní kinetické energie k a rychlosti disipace ε se používají dvě

transportní rovnice:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon, \quad (3.16)$$

kde zdrojové členy S_k a S_ε jsou definovány vztahy

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \mu_t P_B, \quad (3.17)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (3.18)$$

Zde P_B reprezentuje generaci turbulence způsobené vztlačovými silami může být vyjádřena vztahem

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad (3.19)$$

kde g_i je složka gravitačního zrychlení ve směru x_i , $\sigma_B = 0,9$ je konstanta, C_B je konstanta pro kterou platí $C_B = 1$ pro $P_B > 0$ a 0 pro ostatní případy;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2). \quad (3.20)$$

Konstanty $C_\mu = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ jsou určeny empiricky pro Ansys Fluent v uvedených hodnotách.

Když Lewisovo číslo $Le = 1$ pak difusní tok tepla q_i je definován vztahem

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad kde \quad i = 1, 2, 3. \quad (3.21)$$

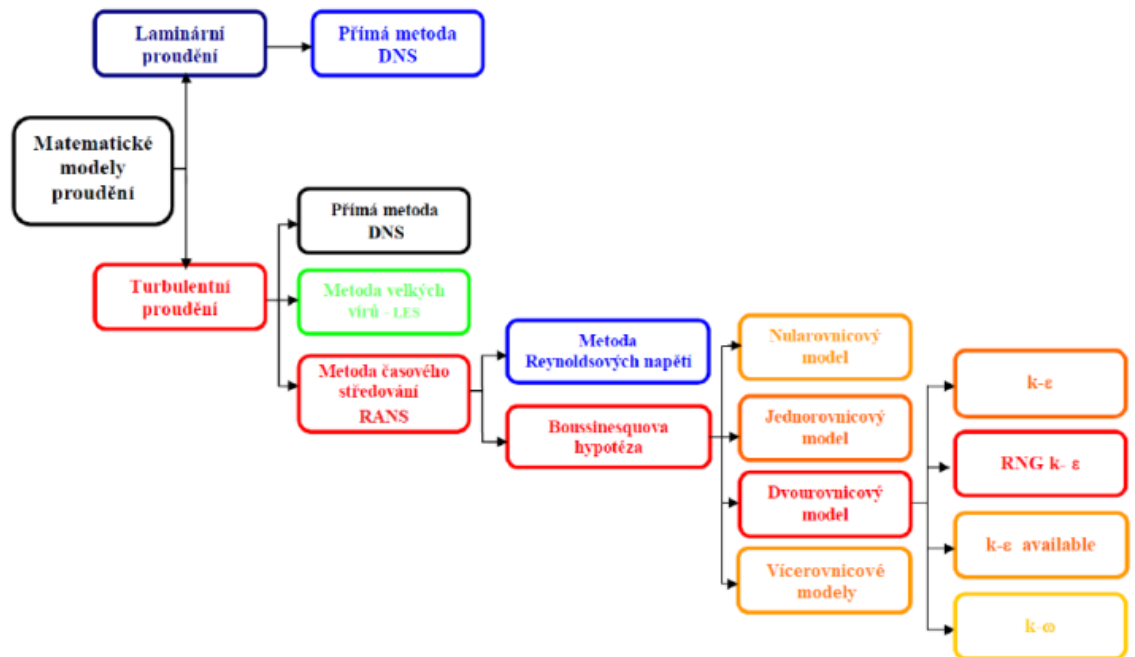
Zde $\sigma_c = 0,9$ je konstanta, Pr je Prandtlovo číslo a h je entalpie tekutiny.

Tyto rovnice popisují laminární a turbulentní proudění. Přechod z laminárního proudění do turbulentního proudění, a naopak je možný. Parametry k a μ_t jsou nulové pro čisté laminární proudění. [14]

3.2 Matematické modelování turbulentního proudění

Modelování turbulence se stále nachází ve stádiu výzkumu a vývoje, který se neustále mění s progresem v matematickém, fyzikálním a technickém odvětví. Pro numerické simulaci turbulentního proudění se používají tři odlišné metody, které vyplývají ze zjednodušených výchozích rovnic, které popisují proudění:

- Metoda přímé simulace (DNS – Direct Numerical Simulation) – je dána velkými nároky na výkon počítače, jelikož tato metoda požaduje kvalitní a jemnou síť. Velikost buněk je odhadována na základě velikostí nejmenších vírů, které disipují na tělo. Počet uzlových bodů prudce narůstá s velikostí Reynoldsova čísla. Výsledky, které se získávají pomocí DNS, jsou považovány za ekvivalentní k výsledkům reálným experimentům. [16]
- Metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation) – tato metoda je založena na modelování velkých vírů, které lze zachytit sítí. Potom jsou tyto víry řešeny metodou přímé simulace. Turbulentní víry o malých měřítcích se na transportních jevech podílejí málo, ale jejich prostřednictvím dochází k disipaci kinetické turbulentní energie v důsledku viskozity na teplo. Malé víry jsou parametrizovány a odstraněny pomocí filtrace turbulentního pole. [16]
- Metoda časového středování (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) – tato metoda se používá pro většinu inženýrských úloh. Používá se metody časového středování veličin turbulentního proudění a základních N-S rovnic. Metody RANS modelují všechny velikosti turbulentních vírů. [16]



Obr. 3.2: Schéma modelů turbulence [17]

3.2.1 Reynoldsova rovnice a Reynoldsovo středování

Metody RANS používají pro popis turbulentního proudového pole pravděpodobnostně-statistický přístup. Tento přístup je založen na průměru souboru dat. Operaci středování souboru hodnot získaných při opakované realizaci procesu definoval Reynolds. Souborové středování je nejobecnější. Pokud se jedná o stacionární turbulenci je nejvhodnější středování časové. Reynolds vycházel z předpokladu, že okamžité hodnoty veličin popisující turbulentní proudění lze rozložit na část časově středovanou a flukuační složku [16]:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi', \quad (3.22)$$

kde

$\bar{\Phi}$ je fluktuační složka veličin,

Φ' je časově středovaná složka veličiny,

přičemž platí:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \Phi(t) dt, \quad (3.23)$$

$$\Phi' = 0, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial x} = 0, \quad (3.25)$$

$$\overline{uv} = \bar{u}\bar{v} + \overline{u'v'}. \quad (3.26)$$

Dosažením rychlosti a tlaku rozložených dle rovnice (3.22) do rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice a jejich středování se získají jejich středované formy:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j). \quad (3.28)$$

Středovaná Navier-Stokesova rovnice se také nazývá Reynoldsova rovnice. Její poslední člen $-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ je tenzor napětí, jehož vznik souvisí s fluktuacemi rychlosti, a nazývá se tenzor Reynoldsových napětí (Reynolds stresses). Tyto napětí existují jen při turbulentním proudění. Ve zcela vyvinutém turbulentním proudění je až na vazkou podvrstvu tenzor Reynoldsových napětí minimálně o dva řády větší než tenzor středního vazkého napětí odpovídající hranaté závorce v rovnici 3.28 [16]

3.2.2 Boussinesquova hypotéza (Boussinesq approach)

Jednou z klasických metod modelování Reynoldsových napětí je Boussinesquova hypotéza o turbulentní viskozitě, podle které jsou Reynoldsova napětí úměrná středním gradientům rychlosti analogicky, jak je tomu u vazkých napětí (Newtonův zákon). Konstantou úměrnosti je turbulentní viskozita μ_t :

$$-\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij}, \quad (3.29)$$

kde k je kinetická energie turbulence

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}). \quad (3.30)$$

Turbulentní viskozita je vlastnost proudění je obecně funkcí polohy a času. Boussinesquova hypotéza je použita v modelech Spalart-Allmaras, k - ε a k - ω . Její výhodou jsou nízké výpočetní nároky pro určení turbulentní viskozity. Spalart-Allmaras řeší pouze jednu dodatečnou transportní rovnici (zastupující turbulentní viskozitu).

Modely $k-\varepsilon$ a $k-\omega$ řeší dvě dodatečné transportní rovnice (pro kinetickou energii turbulence k a disipaci kinetické energie ε , případně specifickou disipaci energie ω) a turbulentní viskozita je vypočtena jako funkce k a ε nebo k a ω .

Nevýhodou Boussinesquovy hypotézy je, že se předpokládá, že je turbulentní viskozita izotropní skalární veličina, což není úplně pravda. Nicméně podmínka izotropní turbulentní viskozity je dobře splněna pro proudění s pouze jedním dominujícím turbulentním napětím. [16]

3.3 Statické modely turbulence

Problém výpočtu turbulentního smykového proudění spočívá v přítomnosti Reynoldsova napětí v rovnicích, které popisují střední pohyb tekutiny, tzn. systém pohybových rovnic není uzavřen na rozdíl od případu laminárního proudění. Soubor přídatných rovnic a empirických vztahů společně s pohybovými rovnicemi tvoří řešitelný systém rovnic, který se nazývá modelem turbulence. [18]

3.3.1 Model směšovací délky (Nularovnicový model)

Rozložení turbulentní vazkosti je závislé na střední hodnotě rychlosti \bar{u} a směšovací délce l_m :

$$v_{turb} = f(\bar{u}, l_m), \quad (3.31)$$

Předpokládá se lokální rovnováha mezi produkcí turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace, tento předpoklad zabezpečuje bezztrátový transport turbulence. Modelem směšovací délky je použitelný pro modelování proudění ve smykové vrstvě. [18]

3.3.2 Jednorovnicový model

Tento model, na rozdíl od nularovnicového modelu, zahrnuje transportní rovnici, a proto postihuje transport turbulentních parametrů. Turbulentní vazkost je dána funkcí turbulentní kinetické energie k a délkového měřítka l :

$$v_{turb} = f(k, l), \quad (3.32)$$

Model se používá v případech, kde je možné reálně popsat rozložení délkového měřítka. V případech, kde nelze stanovit délková měřítka s potřebnou přesností, je třeba použít dvourovnicový model turbulence. [18]

3.3.3 Dvourovnicové modely

- Standart $k-\varepsilon$ model – používá Boussinesquovou hypotézu o vírové viskozitě. Turbulentní vazkost se určují pomocí dvou transportních rovnic – pro turbulentní kinetickou energii k a pro rychlost disipace ε :

$$v_{turb} = f(k, \varepsilon), \quad (3.34)$$

Tento model se používá pro úlohy s vysokým Reynoldsovým číslem ($Re \geq 200000$), ale praktické experimenty prokázaly, že je nepoužitelný v případech obtékání křivočarých těles. [18]

- RNG $k-\varepsilon$ model – je odvozen z klasického modelu $k-\varepsilon$. Využívá se zde matematického postupu normalizačních grup (RNG). Model se používá pro řešení úloh, ve kterých se vyskytují rozsáhlé oblasti se zavíráním a proudění může být až laminární. [18]
- Realizable $k-\varepsilon$ model – je nejnovější z dvourovnicových modelů $k-\varepsilon$. Oproti modelu Standart $k-\varepsilon$ má jinak definovanou turbulentní vazkost ν_{turb} a modifikovanou transportní rovnici pro rychlost disipace ε . Provedené studie ukázaly, že model Realizable dosahuje nejvyššího výkonu ze všech dvourovnicových modelů $k-\varepsilon$. [18]
- Standart $k-\omega$ model – je charakteristický tím, že rychlost disipace ε je nahrazena specifickou rychlostí disipace ω :

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k}, \quad (3.35)$$

Model se používá pro úlohy s nízkým Reynoldsovým číslem ($Re \leq 200000$) a přechodovými režimy proudění, ve kterých není plně vyvinutá turbulence. Nevýhodou je velká citlivost na podmínky ve volné proudu. Model dosahuje nejvyšší přesnosti výpočtu v blízkosti stěn, naopak je tomu ve volném proudu. [18]

- SST $k-\omega$ model SST (Shear Stress Transport) - je hybridní dvourovnicový model, který má výhody modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$. V blízkosti stěny funguje SST jako model $k-\omega$ a ve volném proudu jako $k-\varepsilon$. SST je vhodný pro úlohy s nízkým Reynoldsovým číslem ($Re \leq 5000$). Model je uplatňován zejména u lopatkových strojů, v ostatních aplikacích je přesnost modelu průměrná. [18]

3.3.4 Vícerovnicové modely

Model RSM (Reynolds Stress Model) je nejkomplikovanější z modelů RANS. Je založen na Reynoldsově středování a Reynoldsových napětích. Zahrnuje výpočet šesti nezávislých Reynoldsových napětí pomocí šesti diferenciálních rovnic. Dále je model doplněn o rovnici disipace. Celkem se řeší až dvanáct rovnic: rovnice kontinuity, tři rovnice středované Navier-Stokesovy rovnice, rovnice energie, šest rovnic Reynoldsových napětí a rovnice disipace. Z důvodu vysokého počtu rovnic a nízké konvergence, má RSM model velké výpočetní nároky. Ovšem zvýšené nároky na výpočet většinou nepřináší zvýšenou přesnost oproti jednodušším modelům založeným na turbulentní viskozitě. Použití se modelu RSM nedoporučuje a mělo by se omezit pouze na proudění, u kterých výrazně převažuje rotace či víry. Jelikož tento model nepoužívá izotropní turbulentní viskozitu, má pro tyto případy komplexního proudění větší potenciál na dosažení přesnější predikce než dvourovnicové modely. Nicméně, přesnost je stále omezena použitými předpoklady modelování různých členů, které uzavírající transportní rovnice modelu. [16]

3.3.5 Stěnová funkce

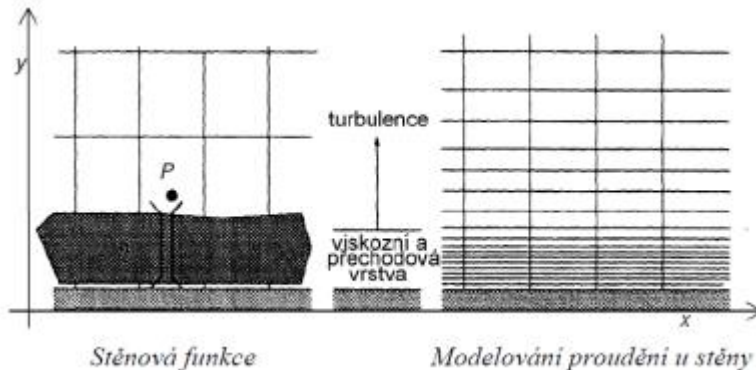
Modelování proudění vedle stěny ovlivňuje přesnost numerického řešení v celé oblasti. V blízkosti stěny se řešené veličiny rychle mění, výrazně se zde uplatňuje přenos hybnosti a skalárních veličin. Turbulence je těsně u stěny potlačena, ve vnější části mezní vrstvy dochází k výrazné produkci turbulentní kinetické energie v důsledku

Reynoldsových napětí a gradientu střední rychlosti. Oblast u stěny se označuje jako mezní vrstva. Mezní vrstvy lze rozdělit na tři druhy [16]:

- Viskózní (laminární) podvrstva – nachází se bezprostředně u stěny, proudění je zde téměř laminární a molekulární viskozita má dominantní vliv na přenos hybnosti, tepla a hmotnosti.
- Plně turbulentní vrstva – je vnější část mezní vrstvy, dominantní úlohu zde hraje turbulence.
- Přechodová vrstva – je umístěna mezi laminární podvrstvou a plně turbulentní vrstvou se vyskytuje, kde se stejnou měrou uplatňují účinky molekulární viskozity i turbulence.

Proudění v blízkosti stěny lze modelovat dvěma způsoby:

- Stěnové funkce (Wall function) – je soubor poloempirických vztahů a funkcí, které umožňují „propojení“ řešené proměnné v buňce v blízkosti stěny s korespondující hodnotou na stěně. Stěnové funkce zahrnují logaritmický zákon pro střední rychlost a teplotu a vztahy pro turbulentní veličiny v blízkosti stěny. Výhodou stěnových funkcí jsou nízké nároky na jemnost výpočetní sítě v blízkosti stěny, a proto nižší nárok na výpočet. [16]
- Modelování proudění u stěny (Near-wall modelling) - jsou modely turbulence modifikovány tak, aby bylo lze řešit všechny části mezní vrstvy. Celý prostor je rozdělen na oblast, ve které se projevuje vliv molekulové viskozity a na turbulentní oblast. Hranice mezi oblastmi je určena pomocí Reynoldsova čísla. Oproti stěnovým funkcím jsou zde vyšší nároky na jemnost výpočetní sítě. Near-wall modelling je doporučeno používat při proudění s nízkým Reynoldsovým číslem. [16]

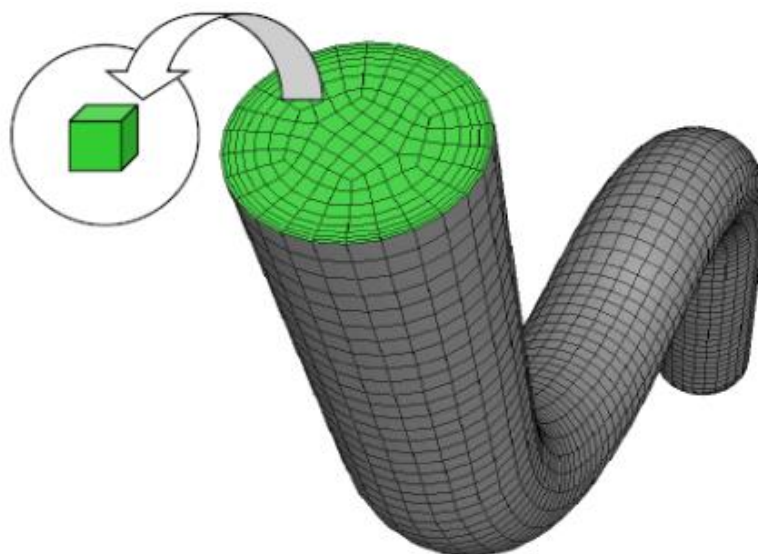


Obr. 3.3: Způsoby modelování proudění v blízkosti stěny [18]

4 DISKRETIZACE, METODA KONEČNÝCH OBJEMU A INTERPOLAČNÍ SCHÉMATA

4.1 Diskretizace

Diskretizace je rozdělení výpočetní oblasti na konečný počet prvků (metoda konečných prvků) nebo objemů (metoda konečných objemů) pomocí výpočetní sítě. Příklad diskretizace na konečný počet objemů je znázorněn na obrázku 4.1.

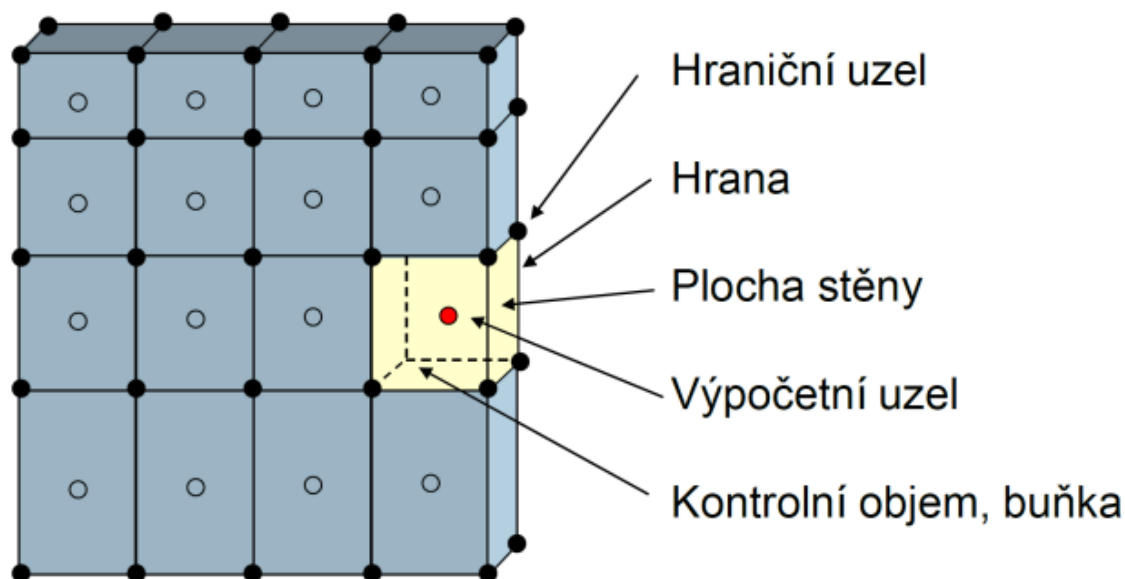


Obr. 4.1: Diskretizace na konečný počet objemů [16]

Diskretizací se nahrazuje spojitého prostředí (kontinuum) systémem diskrétních bodů. V diskrétních bodech se soustředí fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa kontinua. Parciální diferenciální rovnice, které popisují spojité prostředí, jsou diskretizací převedeny na diferenciální, případně algebraické rovnice.

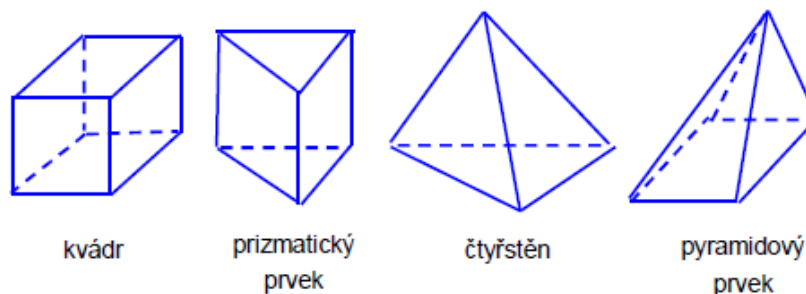
4.2 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů vznikla začátkem 70. let, ale největší rozmach byl zaznamenán v 80. letech. Tato metoda má využití v mechanice tekutin, to znamená při pohybu materiálu přes pevně zadaný objem. Metoda pracuje na principu rozdělení výpočetní oblasti na konečný počet malých kontrolních objemů. Uprostřed kontrolních objemů se nachází hodnoty složek rychlosti a skalárních veličin, hodnoty na hranicích kontrolního objemu se získávají interpolací. Tok přes hranice kontrolního objemu je integrálním součtem přes čtyři nebo šest ploch tohoto objemu. Systém pracuje s vnitřním objemem prvku a výsledek je přenesen přes jeho stěnu. [13]



Obr. 4.2: Princip výpočetní sítě [13]

Jednotlivé prostorové elementy (objemy) se nepřekrývají. Původně se vytvářela tzv. strukturovaná síť, která byla vytvořena z konečných objemů obdélníků a křivočarých čtyřúhelníků (pro dvourozměrné úlohy) nebo obecných šestistěnnů (pro trojrozměrné úlohy). V dnešní době se používá nestrukturovaná síť, kde konečné objemy mají tvar 3D kvádrů, čtyřstěnnů, prizmatického a pyramidového prvku. Prvky, které se používají v metodě konečných objemů, jsou zobrazeny na obrázku 4.3:



Obr. 4.3: Používané prvky metody konečných objemů [16]

4.3 Numerické řešení výpočtu

Výpočet probíhá po cyklech, které jsou označovány jako iterace. Hodnoty nastavených okrajových podmínek působí na okolní buňky sítě a v celém objemu probíhá pod tímto vlivem změna. Výpočet probíhá na základě definovaných rovnic. Na konci každého výpočtu se kontroluje konvergence. Výpočetní cyklus se opakuje do momentu, kdy dojde k ustálení sledovaných hodnot. Každá iterace se skládá z kroků, které jsou zobrazeny na obrázku 4.4:

- pohybové rovnice pro neznámé složky rychlosti jsou řešeny s užitím hodnot tlaků tak, aby se aktualizovalo rychlostní pole,

- rychlosti určené v předchozím bodě nesplňují rovnici kontinuity, proto se určují tzv. tlakové korekce a následně korekce i rychlostního pole,
- pomocí nových hodnot rychlostí se řeší rovnice pro turbulentní energii k a disipaci ϵ ,
- následuje řešení dalších rovnic pro určení teploty a dalších skalárních veličin,
- aktualizace fyzikálních vlastností kapalin (např. viskozita),
- kontrola konvergence.



Obr. 4.4: Schéma iteračního cyklu [15]

4.4 Výpočetní síť

Řešený objekt je rozdělen sítí na konečný počet objemů při použití metody konečných objemů. Síť rozděluje výpočetní oblast na vzájemně navazující buňky. Vytvořená síť má zásadní dopad na rychlost konvergence, přesnost výpočtu a časovou náročnost výpočtů. Kvalitní síť musí mít správnou hustotu a v oblasti mezních vrstev u pevných stěn musí být zhuštěná. Nastavení sítě je velice důležité a nelze jej podceňovat. Na obrázku 4.5 je znázorněna výpočetní síť. Rozdělením výpočetní oblasti na konečný počet objemů dochází k přeměnění oblasti spojitě na oblast diskrétní. Diskrétní oblast je taková oblast, kde se nachází systém diskrétních bodů, které obsahují fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti daného objemu. Prostor je rozdělen základní sítí (největší čtverce). V místech, kde je předpoklad složitějšího proudění, případně oblast, která nás zajímá, je potřeba zjemnit síť.

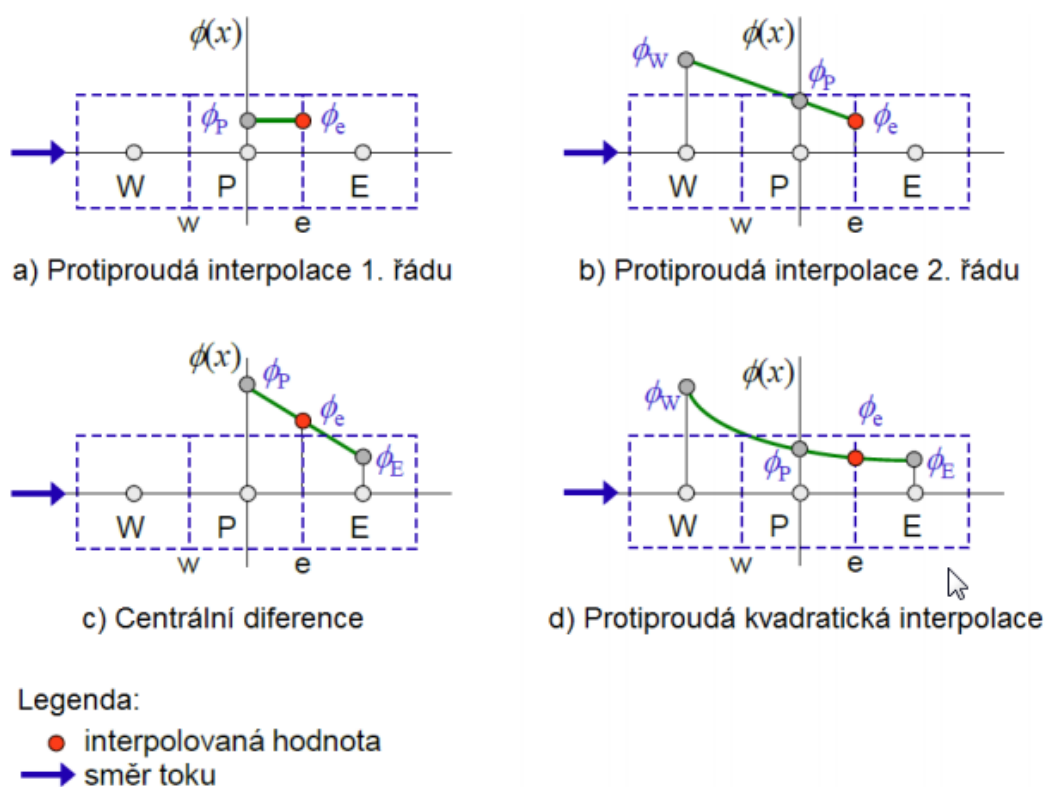
Zjemněním sítě se do určité míry zjemnění dosahuje přesnějších výsledků.

Zjemnění lze nastavit až do devátého stupně. Pravidlo čím jemnější síť, tím přesnější výsledek platí jenom do určité úrovně, dále při dalším zjemňování výsledek zůstává stejným, proto je třeba mít síť nastavenou právě do této míry jemnosti. Platí, že čím je jemnější síť, tím je výpočet delší. [18]

Pro každou buňku se vypočítá numerickými metodami diferenciální rovnice. Hodnota je vypočtena pro výpočetní uzel, který se nachází ve středu buňky. Hodnoty na stěnách buňky se získávají pomocí interpolací vypočtených hodnot.

Možnosti interpolací:

- Protiproudá interpolace 1. řádu: předpokládá se, že hodnota na stěně je rovna hodnotě v centru buňky ležící vlevo (proti proudu).
- Protiproudá interpolace 2. řádu: určuje hodnotu na stěně z hodnot v centrech dvou buněk ležící vlevo (proti proudu).
- Centrální difference: určuje hodnotu na stěně pomocí lineární interpolace mezi hodnotami ve středu sousedících buněk.
- Protiproudá kvadratická interpolace: kvadratická křivka je aproximována ze dvou uzlů ležících proti proudu a jednoho uzlu, který leží po proudu. [18]



Obr. 4.5: Interpolační schémata [18]

5 ANSYS FLUENT – METODY ŘEŠENÍ ÚLOHY

ANSYS Fluent používá pro výpočty jednu ze dvou numerických metod [20]:

- Pressure-based solver
- Density-based solver

5.1 Pressure-based solver

Pressure-Based solver používá algoritmus, který se řadí do projekčních metod. Algoritmus vypočítá tlak (korekce tlaku) z rovnic kontinuity a hybnosti. Na základě výsledků tlaku je korigována rychlost tak, aby byla dosažena podmínka zachování hmotnosti (kontinuity).

Metoda Pressure-based solver se původně používala pro řešení úloh s nízkou rychlostí nestlačitelné tekutiny. [20]

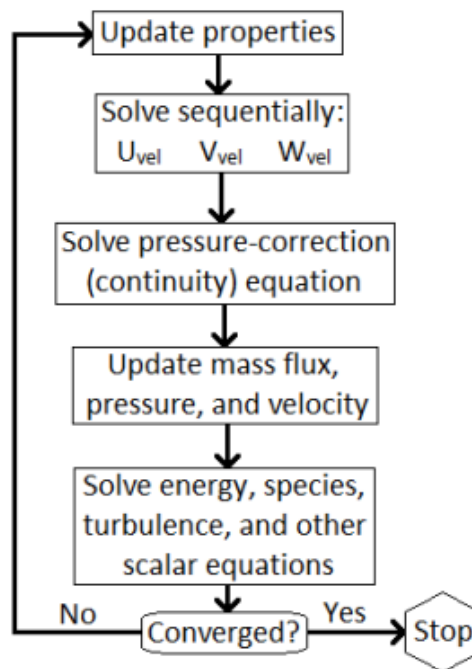
5.1.1 Pressure-Based sekvenční algoritmus

Pressure-Based solver využívá algoritmus, kde se rovnice řeší sekvenčně. Jelikož jsou rovnice nelineární a závislé, výpočet probíhá opakovaně (v iteračních cyklech), dokud nebudou splněny konvergenční kritéria.

V sekvenčním algoritmu jsou rovnice pro výsledné proměnné ($u, v, w, p, T, k, \varepsilon$) řešeny jedna po druhé \rightarrow sekvenčně. Algoritmus efektivně využívá paměť, jelikož se v každý časový okamžik v paměti nachází jenom jedna diskretizovaná rovnice. Nevýhodou sekvenčního algoritmu je pomalá konvergence řešení. [19]

V sekvenčním algoritmu se každá iterace skládá z několika kroků ilustrovaných na obrázku 5.1 [19]:

1. Aktualizace vlastností tekutiny (např.: hustota, viskozita, specifické teplo), včetně turbulentní vazkosti na základě současného řešení.
2. Sekvenční řešení rovnic hybnosti, pomocí aktualizovaných hodnot tlaku a hmotnostních toků.
3. Řešení rovnice korekce tlaku pomocí získaného pole rychlosti a hmotnostního toku.
4. Oprava hmotnostního toku, tlaku a pole rychlosti pomocí rovnice korekce tlaku, která byla získána v bodě 3.
5. Řešení rovnic pro ostatní skaláry (turbulentní veličiny, energie, intenzita záření a další rovnice).
6. Aktualizace zdrojových podmínek.
7. Kontrola konvergence rovnic



Obr. 5.1: Sekvenční algoritmus Pressure-Based [19]

Mezi sekvenční algoritmy patří [20]:

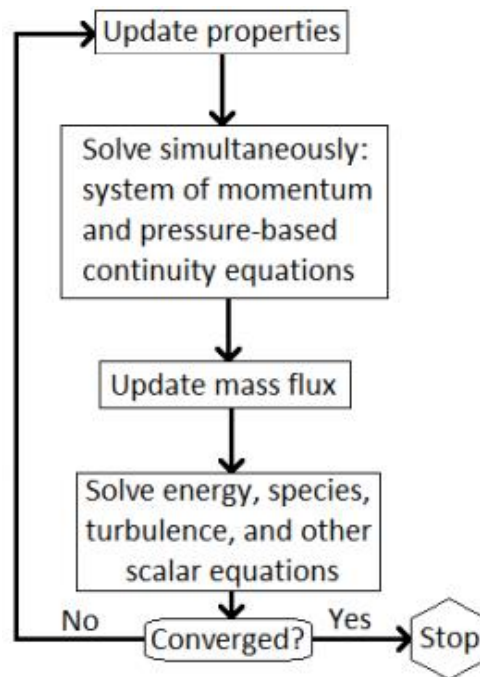
- SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) – je konzervativní metoda, která využívá vazbu mezi korekcemi rychlosti a tlaku.
- SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) – je modifikovaný algoritmus SIMPLE. Používá se při řešení nekomplikovaných problémů (příkladem může být čistě laminární proudění).
- PISO (Pressure-Implicit with Splitting Operators) – patří do skupiny SIMPLE algoritmů. Metoda je založena na vyšším stupni aproximací mezi korekcemi tlaku a rychlosti
- FSM (Fractional Step Method) – je metoda rozděleného kroku. Tato metoda je výpočtově méně náročná než PISO. Metoda je určena pouze pro časově proměnné úlohy.

5.1.2 Pressure-Based sdružený algoritmus

Pressure-Based sdružený algoritmus řeší souběžně systém rovnic, který zahrnuje rovnice hybnosti a tlaku na základě schématu Pressure-Based sekvenčního algoritmu – kroky 2. a 3. ze sekvenčního algoritmu jsou spojené do jednoho (viz obrázek 5.2). Zbývající rovnice se řeší odděleně stejně jako u sekvenčního algoritmu.

Jelikož rovnice hybnosti a kontinuity jsou řešeny sdruženě, rychlost konvergence řešení je výrazně vyšší než u sekvenčního algoritmu. Nevýhodou na rozdíl od sekvenčního algoritmu je větší náročnost na paměť. Do paměti se ukládá diskretní systém rovnic hybnosti a systém rovnic řešený schématem na obrázku 5.1., kde je prováděn výpočet rychlosti a tlakových polí.

Sdružený algoritmus se používá při přechodových stavech, kdy je výpočtová síť příliš hrubá, je použit vysoký časový krok nebo dochází k velkým změnám rychlosti (0,3 mach) a tlaku. Mezi sdružené algoritmy patří COUPLED. [20]

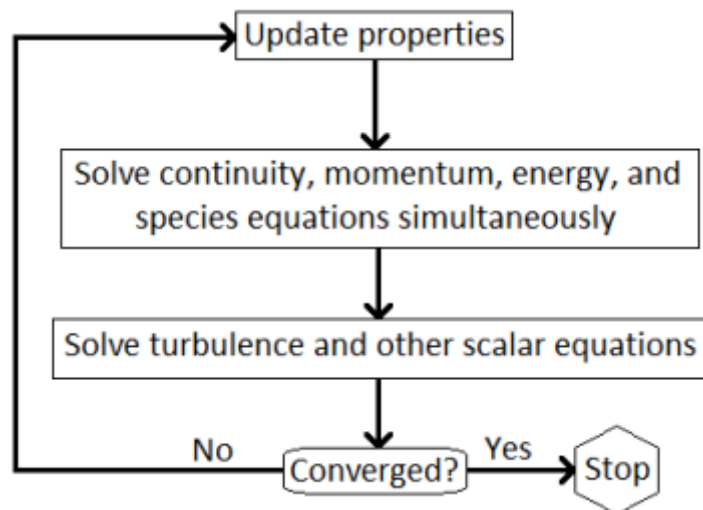


Obr. 5.2: Pressure-Based sdružený algoritmus [19]

5.2 Density-based solver

Density-Based solver řeší rovnice kontinuity, hybnosti, energie a dalších proměnných současně. Rovnice pro ostatní skaláry jsou vyřešeny následně a odděleně. Podobně jako algoritmus Pressure-Based solver musí být proveden určitý počet iteračních cyklů pro splnění konvergenčních kritéria. Každá iterace se skládá z následujících kroků [19]:

1. Aktualizace vlastností tekutiny na základě výsledků aktuálního řešení. Pokud výpočet právě začíná, budou vlastnosti tekutiny aktualizovány na základě inicializovaného řešení.
2. Simultánní řešení rovnic kontinuity, hybnosti, energie a dalších proměnných.
3. Řešení turbulence a ostatních skalárních rovnic pomocí aktualizovaných hodnot ostatních proměnných.
4. Kontrola konvergence souboru rovnic.



Obr. 5.3: Algoritmus Density-Based solveru [19]

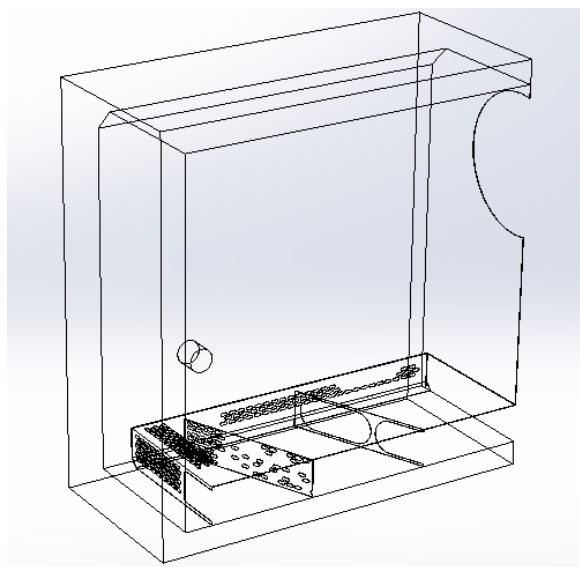
Density-based solver používá dva přístupy linearizace rovnic [20]:

- Implicitní – Neznámé hodnoty jsou stanoveny z existujících i neznámých hodnot sousedních buněk. Každá neznámá se objevuje ve více rovnicích v soustavě. Rovnice jsou řešeny současně. Implicitní přístup je náročný, přesnější a vhodný pro vyšší časové nároky.
- Explicitní – Neznámé hodnoty jsou stanoveny z existujících hodnot. Každá neznámá se objevuje pouze v jedné rovnici soustavy. Rovnice jsou řešeny jedna po druhé. Explicitní přístup je jednoduchý, méně přesný a někdy nestabilní.

Metoda Density-based solver byla původně určena pro řešení úloh s vysokou rychlostí stlačitelné tekutiny. [20]

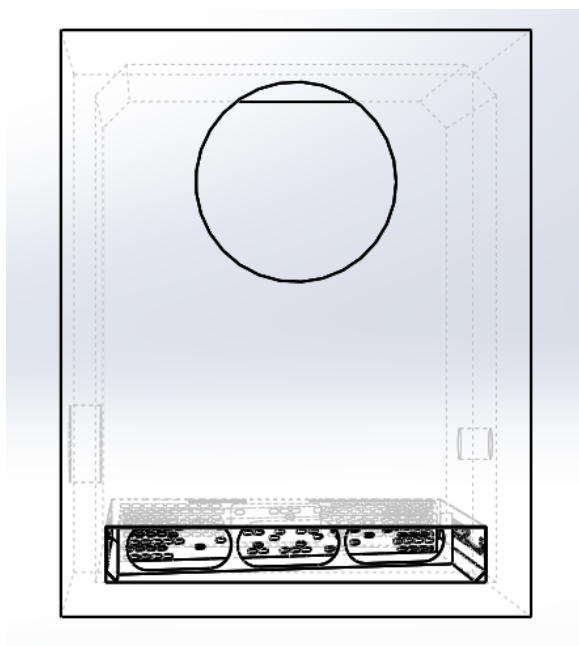
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Práce se zabývá analýzou proudění a rozložení teploty v klimatické komoře pomocí metody konečných objemů s ohledem na rychlost ventilace. Prvním úkolem je vytvořit 3D objemový model klimatické komory v CAD programu SolidWorks. Na obrázku 6.1 je řez modelem klimatické komory Weiss WK3-340/40.

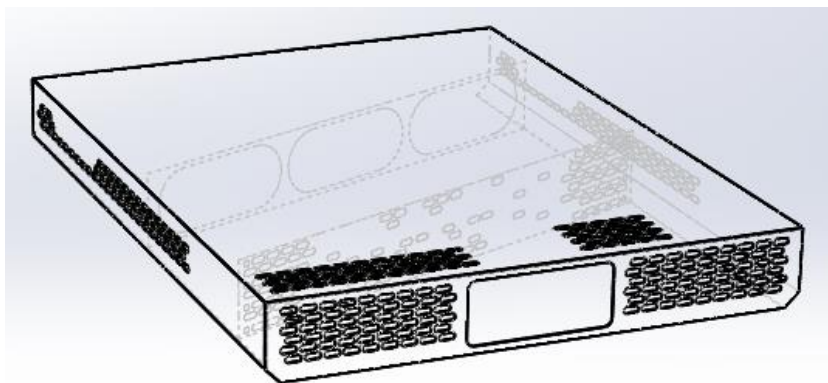


Obr. 6.1: Řez modelem klimatické komory Weiss WK 340.

Za horním otvorem (viz obrázek 6.2) je umístěn ventilátor, který slouží pro vysávání vzduchu z pracovního prostoru klimatické komory. Vzduch cirkuluje za zadní stěnou komory a je ohřát pomocí topných těles. Potom ohřátý vzduch vstupuje do pracovního prostoru přes spodní otvor a šíří se pomocí spodního plechu (viz obrázek 6.3).



Obr. 6.2: Vymodelovaný prostor klimatické komory. Pohled ze zadní strany.



Obr. 6.3: Vymodelovaný spodní plech pracovního prostoru.

6.1 Simulace v ANSYS Fluent

Tato kapitola se zabývá síťováním a nastavením matematického modelu v preprocesoru systému ANSYS Fluent a analýzou proudění a rozložení teploty v klimatické komoře pomocí metody konečných objemů s ohledem na rychlost ventilace.

6.1.1 Nastavení sítě

Pro výpočtovou síť byly zvoleny konečné objemy tvaru čtyřstěnů. Jemnost výpočetní sítě byla volena s ohledem na významnost jednotlivých oblastí:

- Klimatická komora: 19,4 mm;
- Horní část pracovního prostoru komory: Velikost elementů: 40 mm;
- Střední část pracovního prostoru komory: Velikost elementů: 30 mm;
- Dolní část pracovního prostoru komory: Velikost elementů: 15 mm;
- Spodní plech pracovního prostoru komory: Velikost elementů: 2 mm.

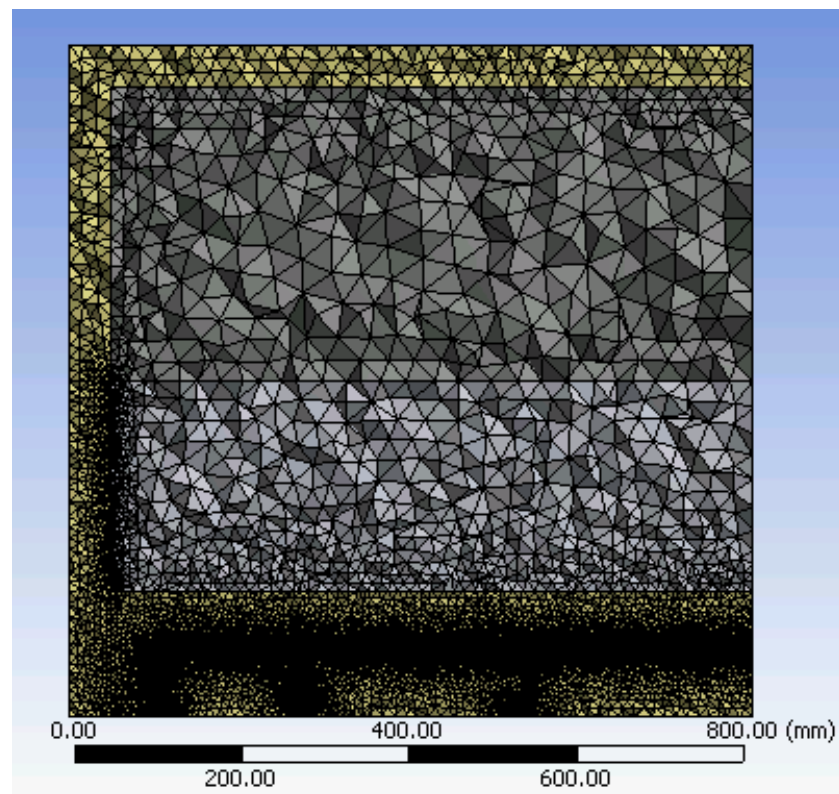
Největší zjemnění výpočetní sítě bylo voleno v oblasti spodního plechu pracovního prostoru klimatické komory. Ukázka výpočetní sítě je uvedena na obrázku 6.4. Detail výpočetní sítě je uveden na obrázku 6.5.

Parametry, které byly nastaveny při tvorbě výpočetní sítě:

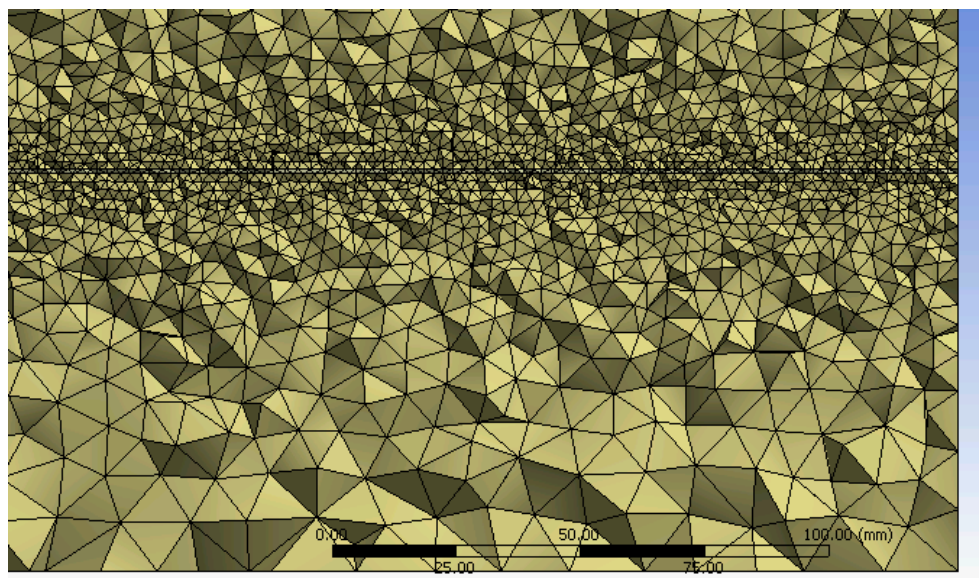
- Sizing
 - Use Advanced size Function: On: Uniform;
 - Transition: Slow.
- Inflation
 - Inflation Option: Smooth Transition;
 - Transition ratio: 0.272;
 - Maximum Layers: 5;
 - Growth Rate: 1.2.

Statistické údaje:

- Počet uzlů: 2210364;
- Počet elementů: 13087868.



Obr. 6.4: Výpočetní síť.



Obr. 6.5: Detail výpočetní sítě.

6.1.2 Výpočty

Pro simulaci v ustáleném stavu a metodu řešení byl zvolen Pressure-Based solver. Byl použit sdružený algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Vstupem

je spodní otvor, výstupem je horní otvor, za kterým je umístěn ventilátor.

Tab. 6.1: Přehled nastavení výpočtů pro ustálenou analýzu:

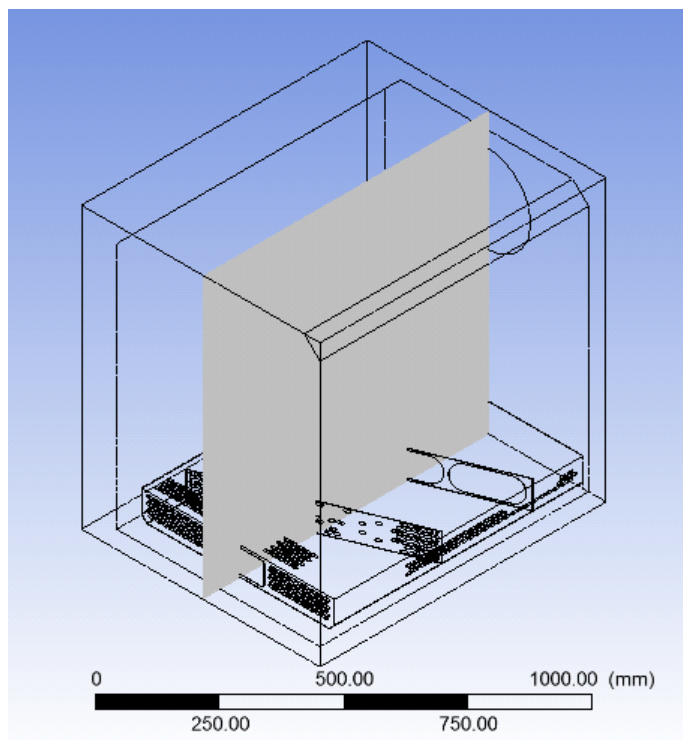
Metoda řešení	Algoritmus	Protiproudá interpolace	Teplota	Hmotnostní průtok vzduchu
Pressure-Based solver	COUPLED	2. řád	85 °C	0,001 kg/s
Pressure-Based solver	COUPLED	2. řád	85 °C	0,01 kg/s

Tab. 6.2: Přehled nastavení výpočtů pro časovou analýzu:

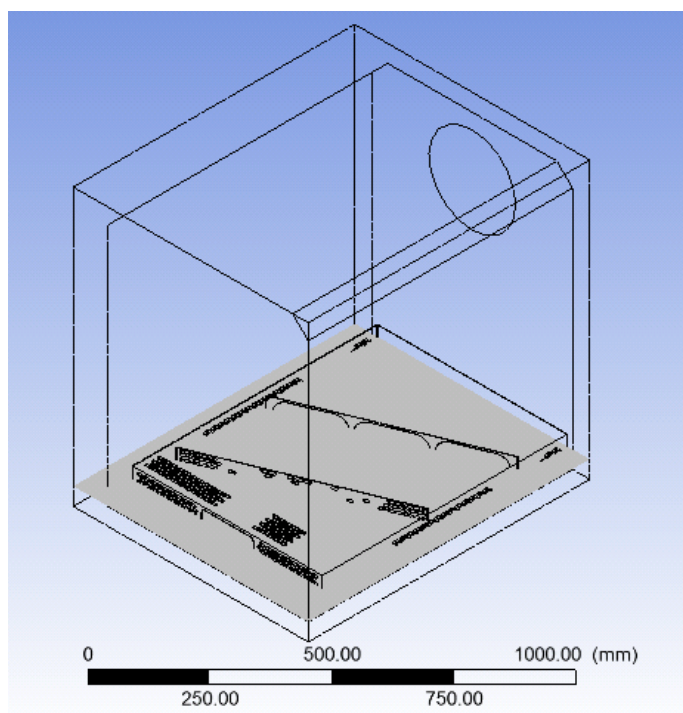
Metoda řešení	Algoritmus	Protiproudá interpolace	Teplota v pracovním prostoru	Teplota na vstupu	Hmotnostní průtok vzduchu
Pressure-Based solver	COUPLED	2. řád	25 °C	28 °C	0,001 kg/s
Pressure-Based solver	COUPLED	2. řád	25 °C	28 °C	0,005 kg/s
Pressure-Based solver	COUPLED	2. řád	25 °C	28 °C	0,01 kg/s

Z výpočtů byly vyhodnocovány následující oblasti klimatické komory:

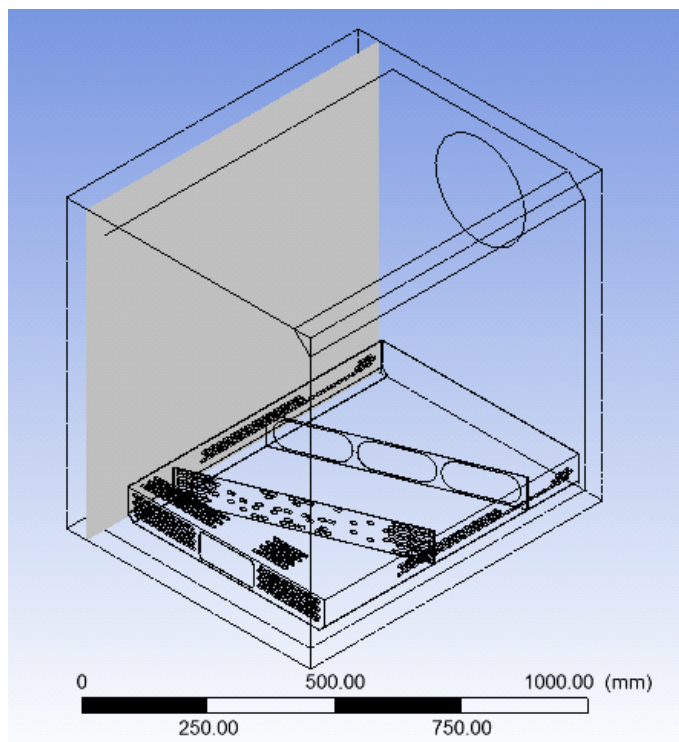
- Rovina v ose XZ ve středu pracovního prostoru (viz obrázek 6.6);
- Rovina v ose XY uprostřed spodního plechu pracovního prostoru (viz obrázek 6.7);
- Rovina v ose XZ ve středu mezi bočními stěny komory a spodního plechu (viz obrázek 6.8).



Obr. 6.6: Rovina v ose XZ ve středu pracovního prostoru



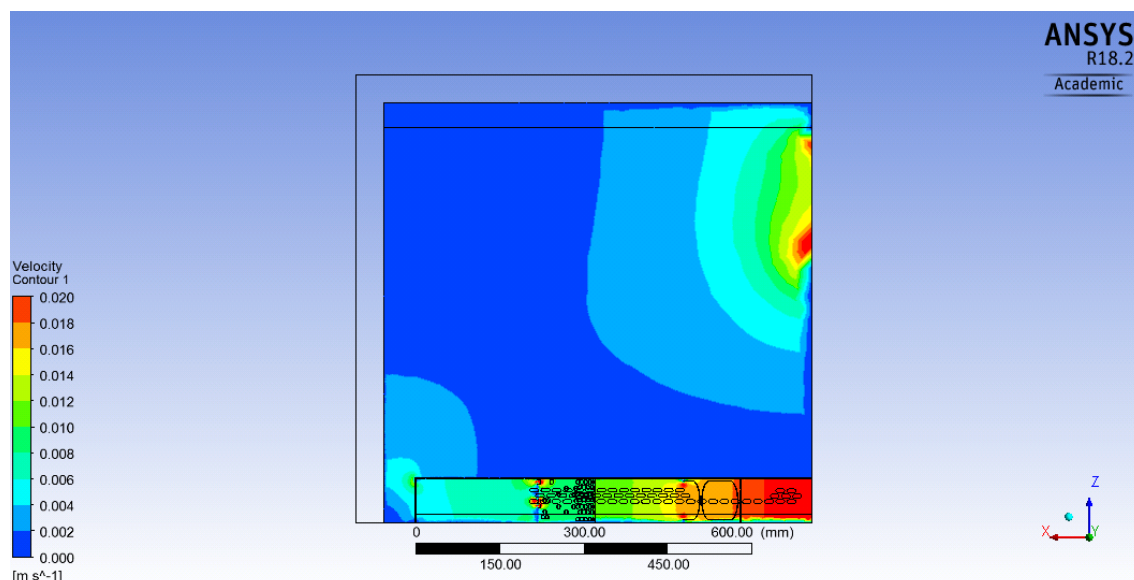
Obr. 6.7: Rovina v ose XY uprostřed spodního plechu pracovního prostoru



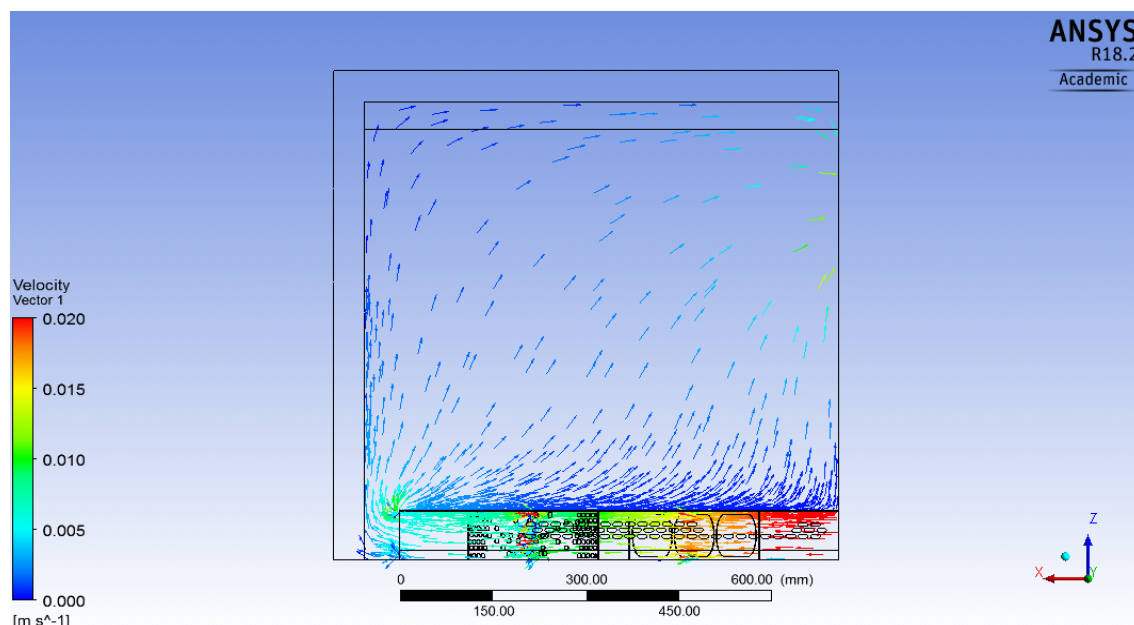
Obr. 6.8: Rovina v ose XZ ve středu mezi bočními stěny komory a spodního plechu

6.1.3 Výsledky simulace v ustáleném stavu

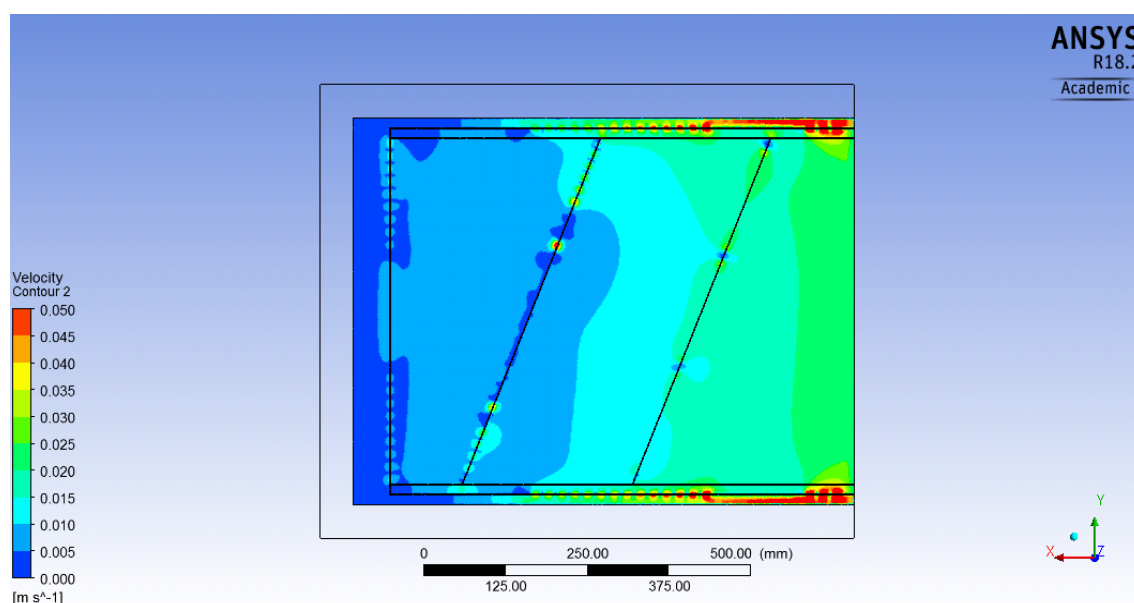
Na obrázcích 6.9 až 6.14 jsou znázorněny výsledky rychlosti a vektorů při využití Pressure-Based, sekvenční algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Nastavená ustálená teplota je 85 °C. Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu je 0,001 kg/s.



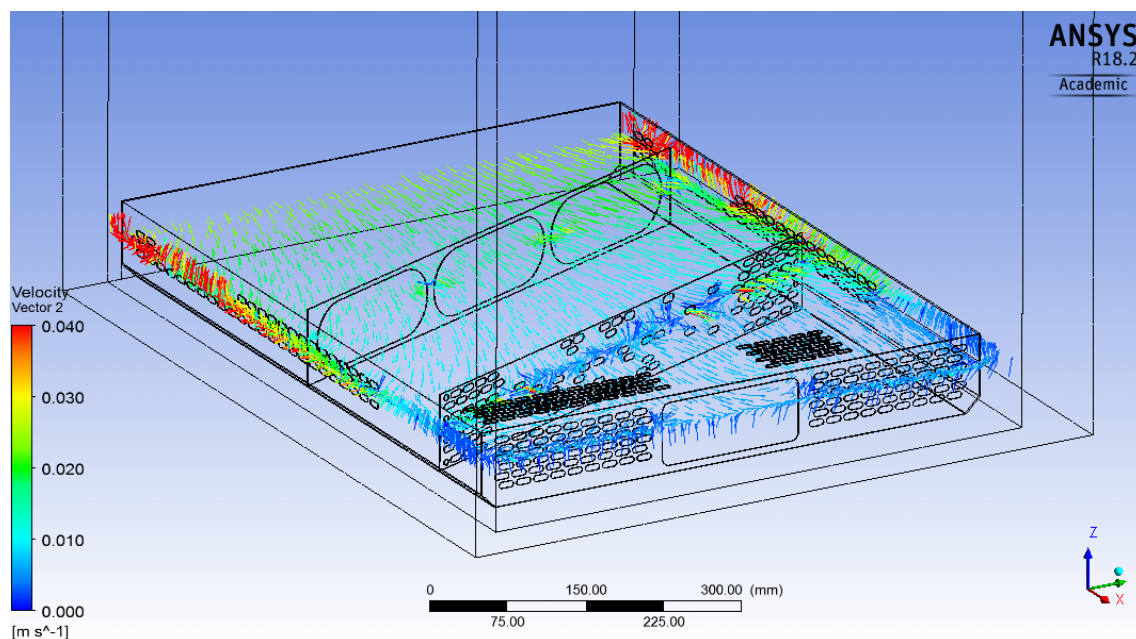
Obr. 6.9: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře.



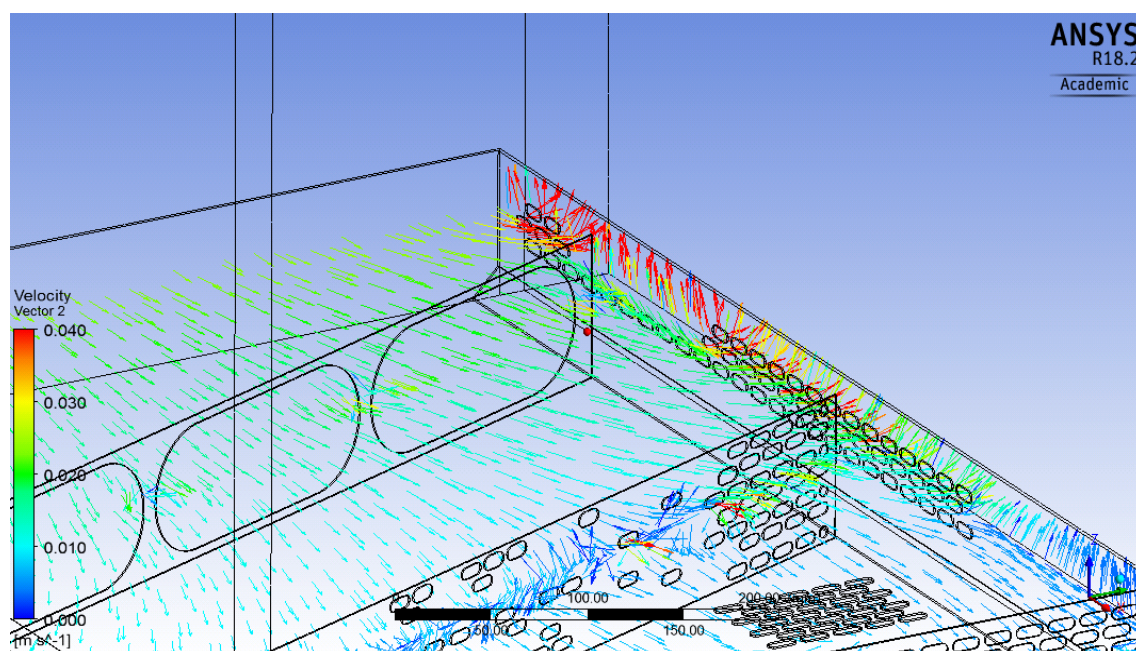
Obr. 6.10: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře.



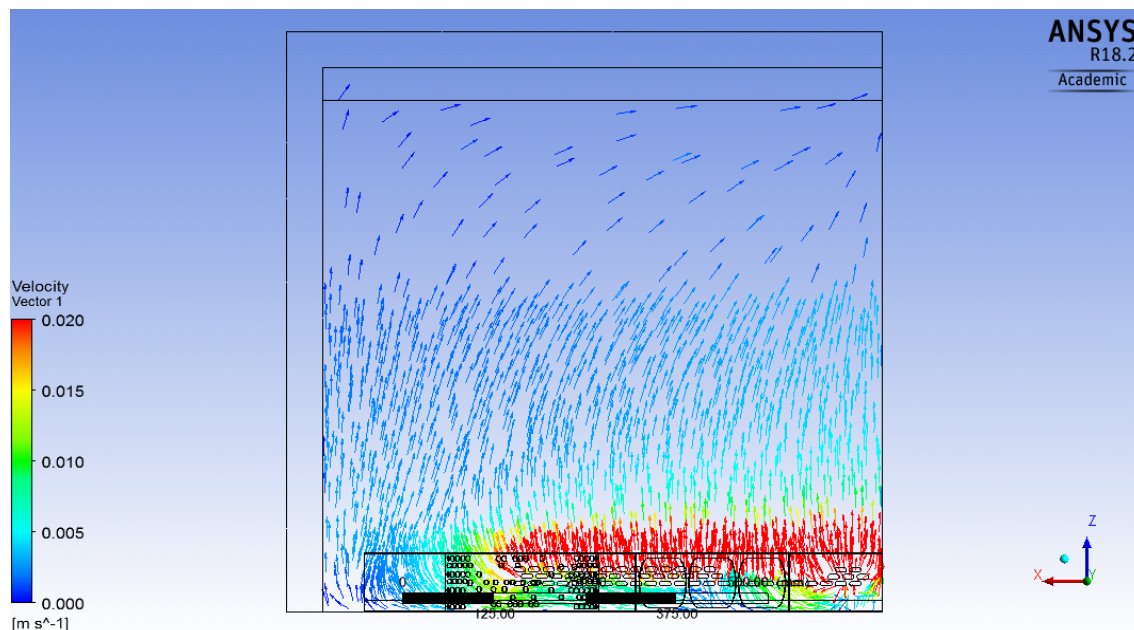
Obr. 6.11: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část.



Obr. 6.12: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část.

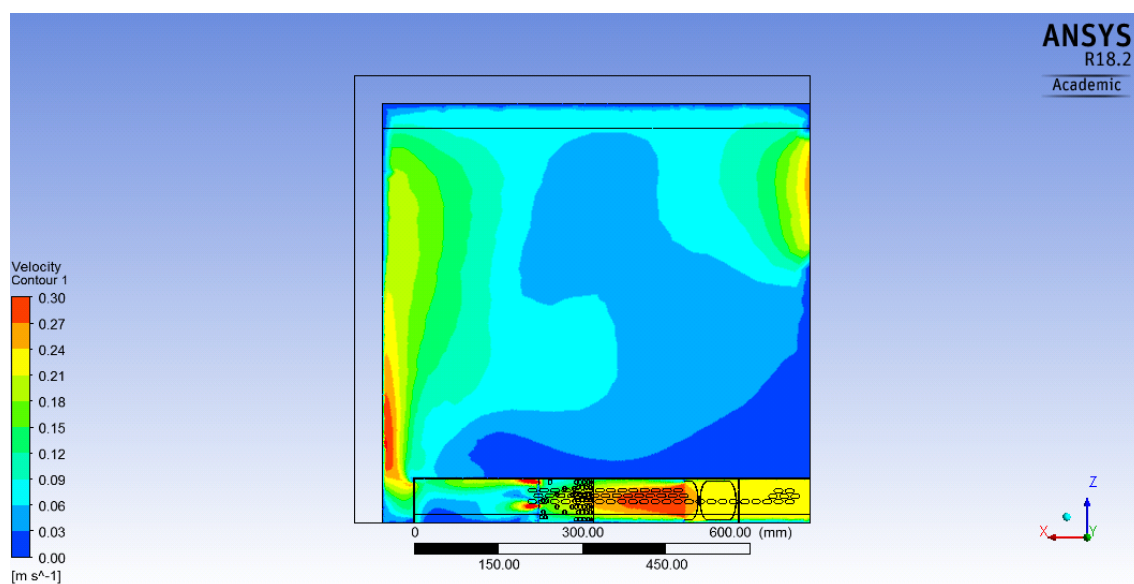


Obr. 6.13: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část. Detail.

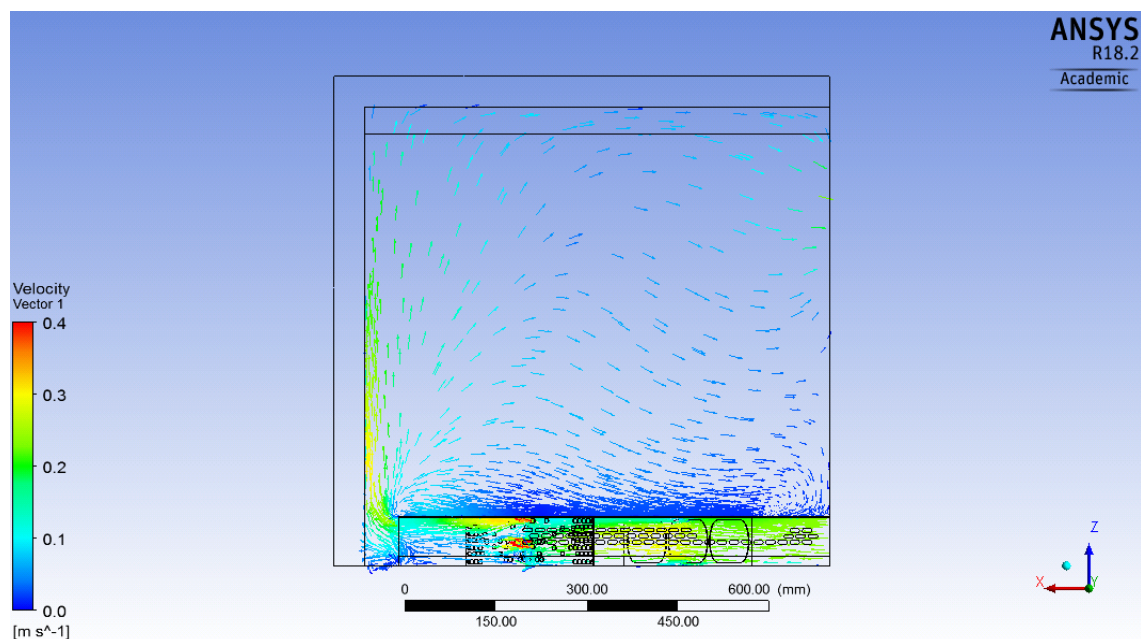


Obr. 6.14: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočními stěny komory a spodního plechu.

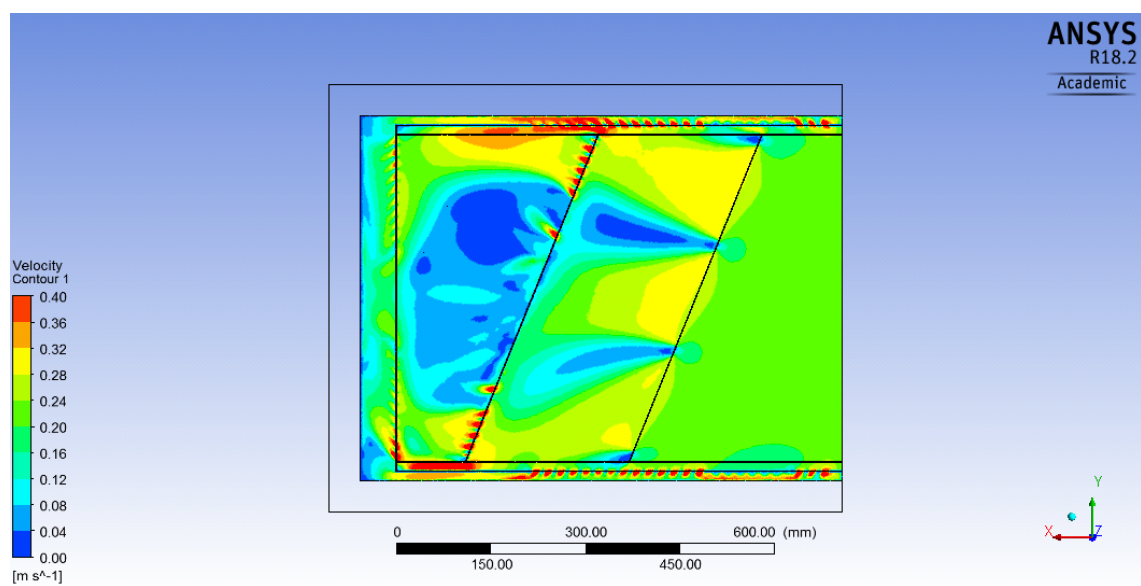
Na obrázcích 6.15 až 6.20 jsou znázorněny výsledky rychlosti a vektorů při využití Pressure-Based, sekvenční algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Nastavená ustálená teplota je 85 °C. Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu je 0,01 kg/s.



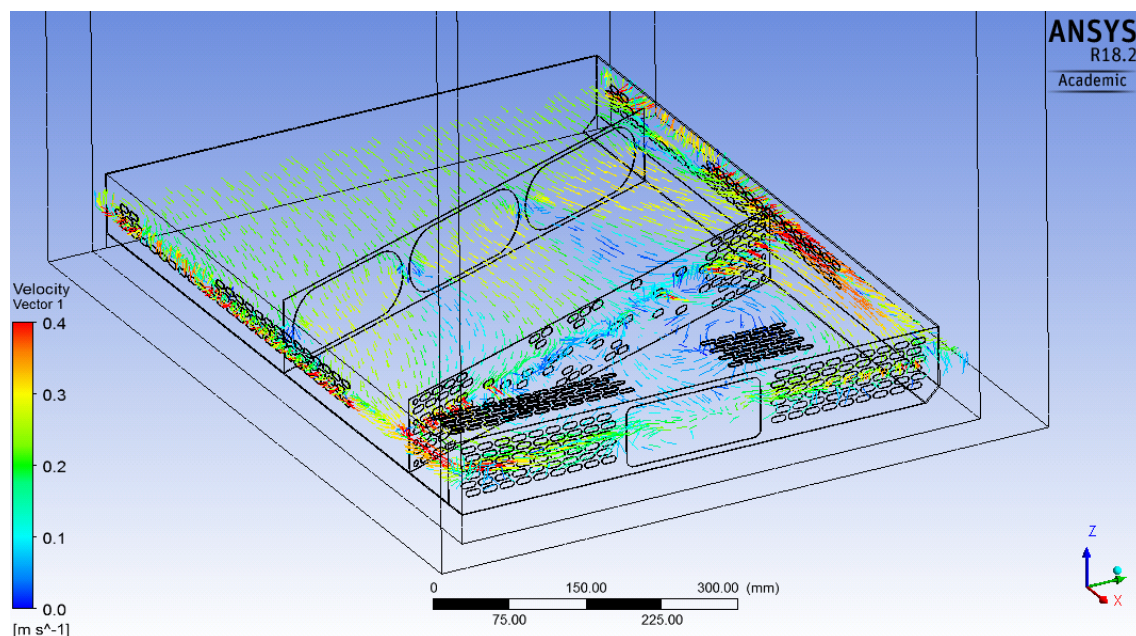
Obr. 6.15: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře.



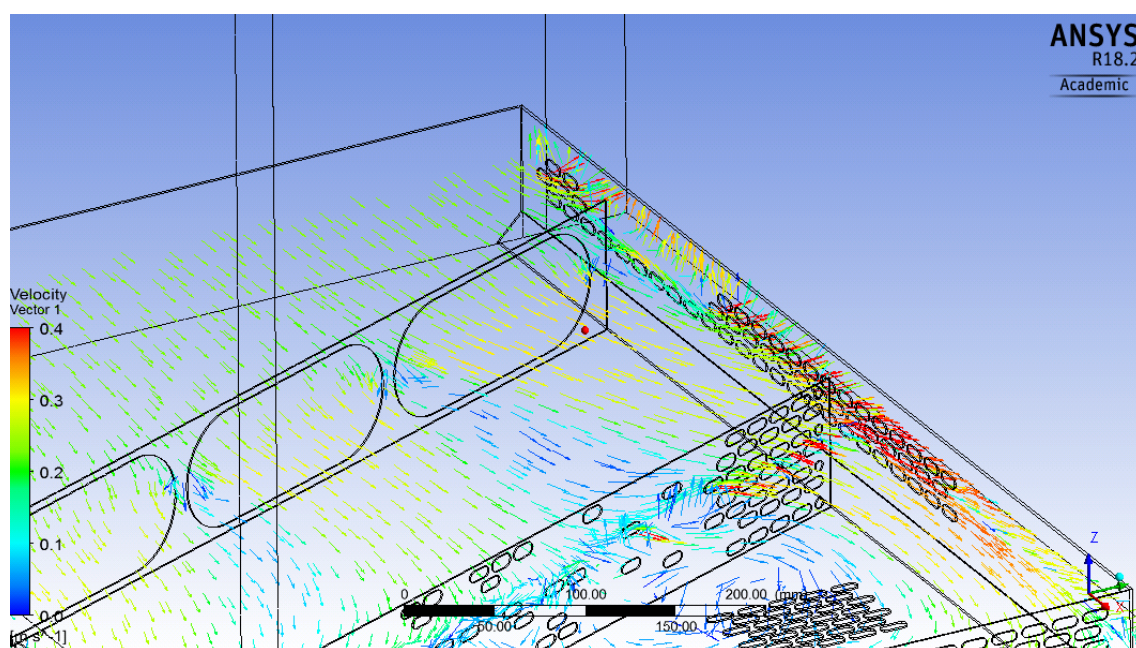
Obr. 6.16: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře.



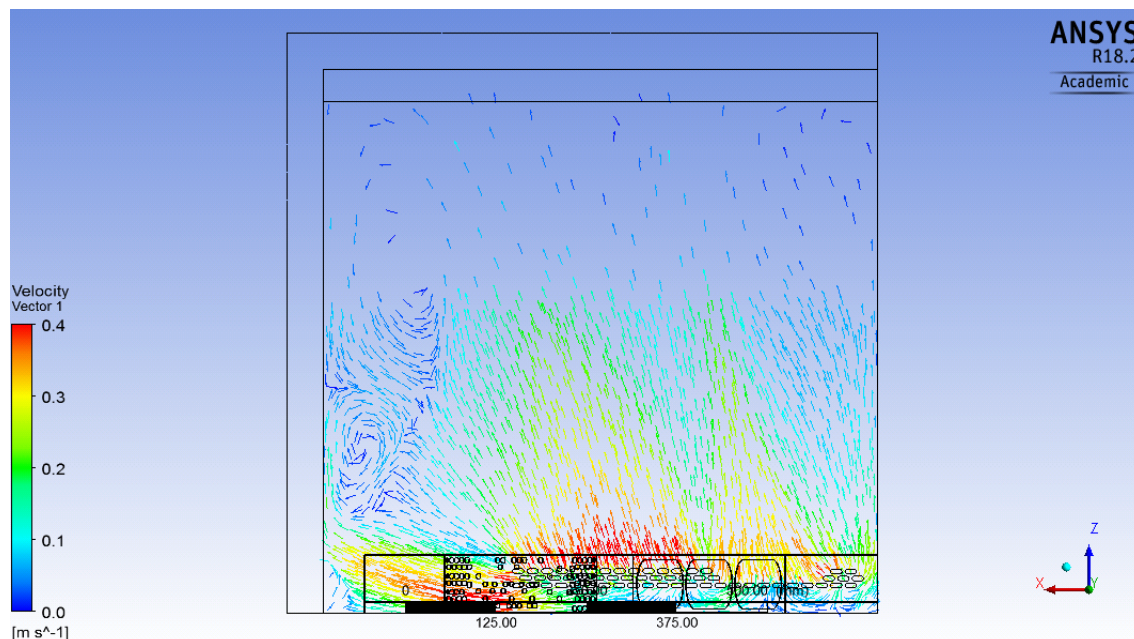
Obr. 6.17: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část



Obr. 6.18: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část.



Obr. 6.19: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část. Detail.

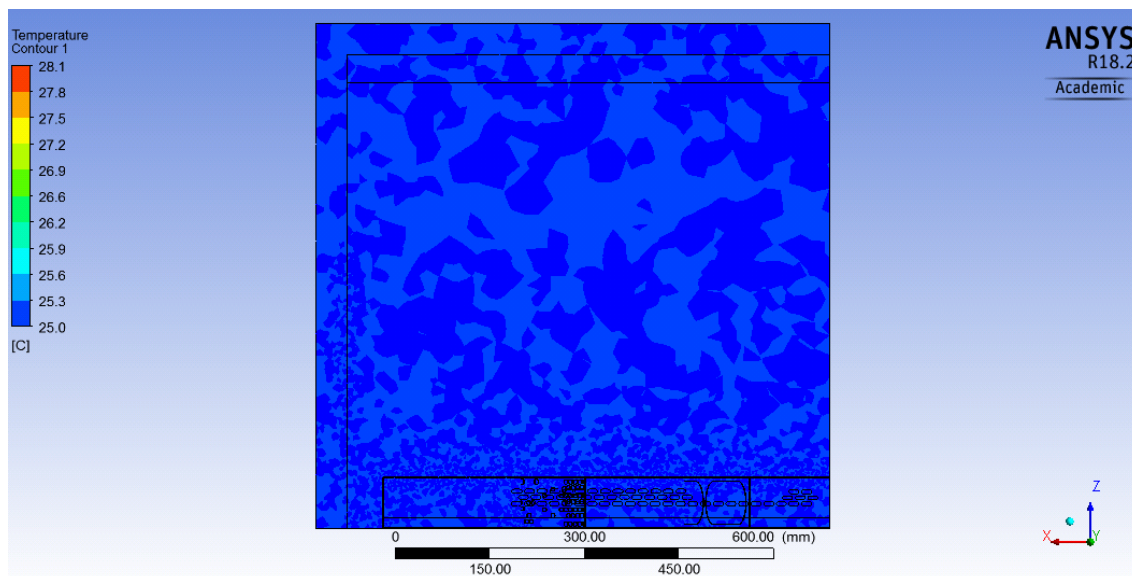


Obr. 6.20: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočními stěny komory a spodního plechu.

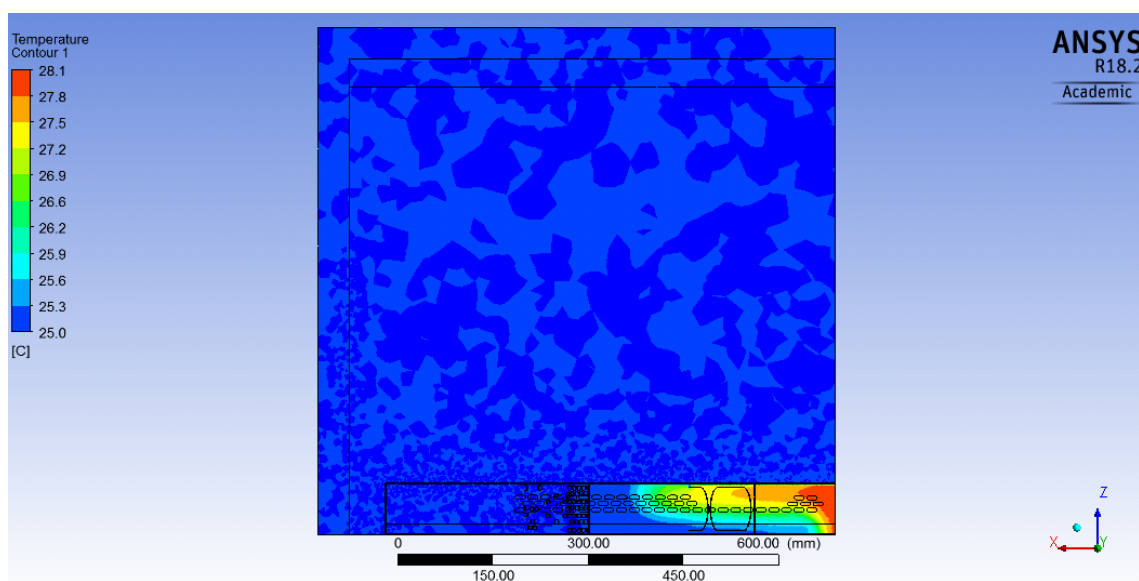
Výsledky simulací ukazují, že hmotnostní průtok vzduchu 0,001 kg/s je nevyhovující, při němž nedochází k dostačujícímu rozložení proudění v celém pracovním prostoru klimatické komory. Při hmotnostním průtoku vzduchu 0,01 kg/s již dochází k dostačujícímu rozložení proudění vzduchu v celém pracovním prostoru.

6.1.4 Výsledky simulace časové analýzy

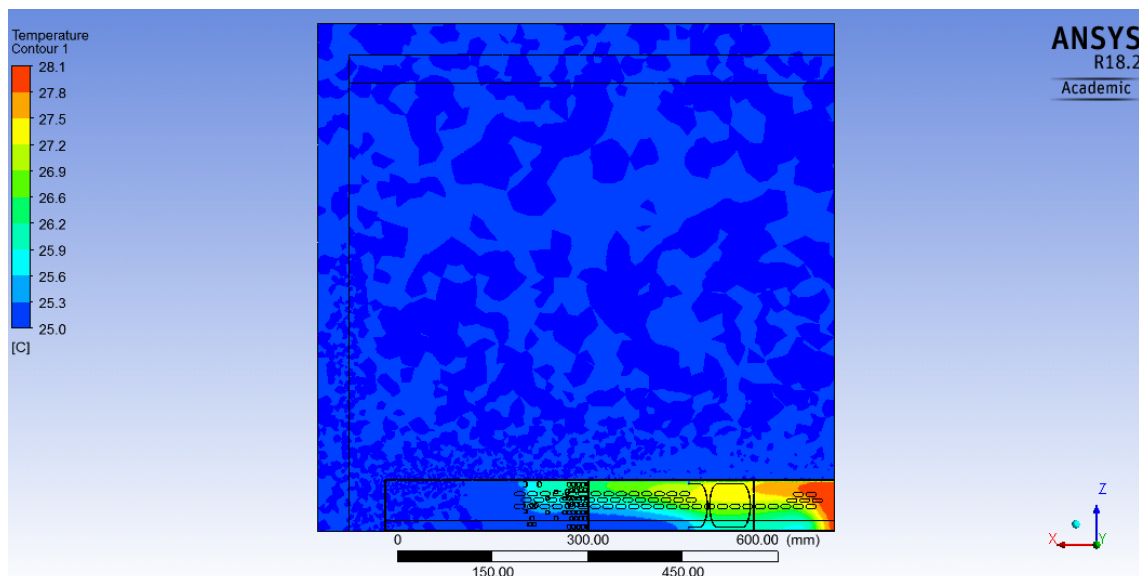
Na obrázcích 6.21 až 6.24 jsou znázorněny výsledky rozložení teploty v klimatické komoře při využití Pressure-Based, sekvenční algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Počáteční teplota je 25 °C, teplota na vstupu je 28 °C. Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu je 0,001 kg/s. Čas simulace je 30 s.



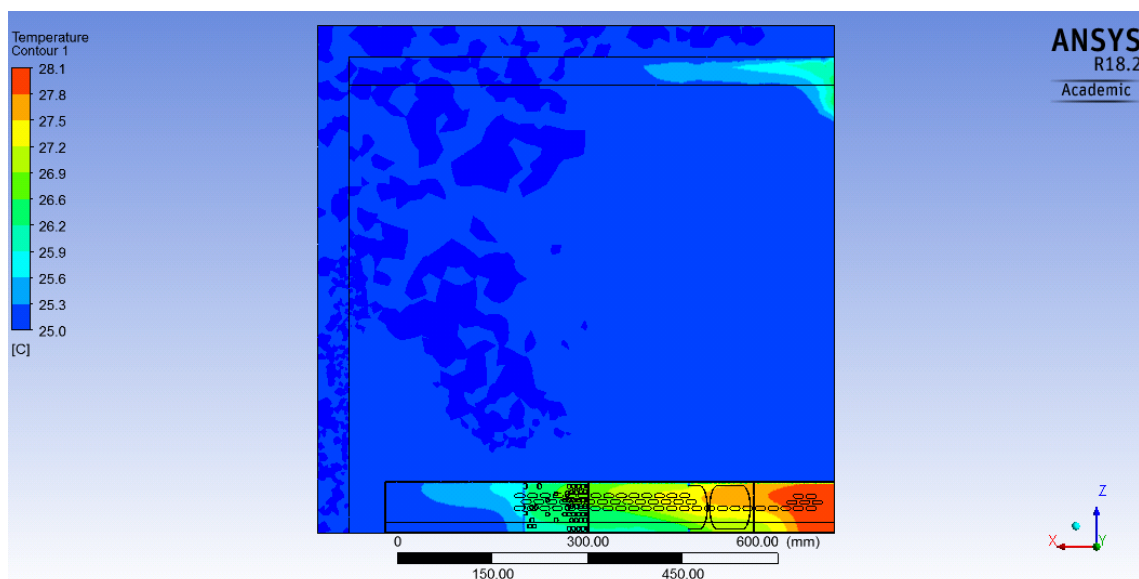
Obr. 6.21: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s



Obr. 6.22: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.

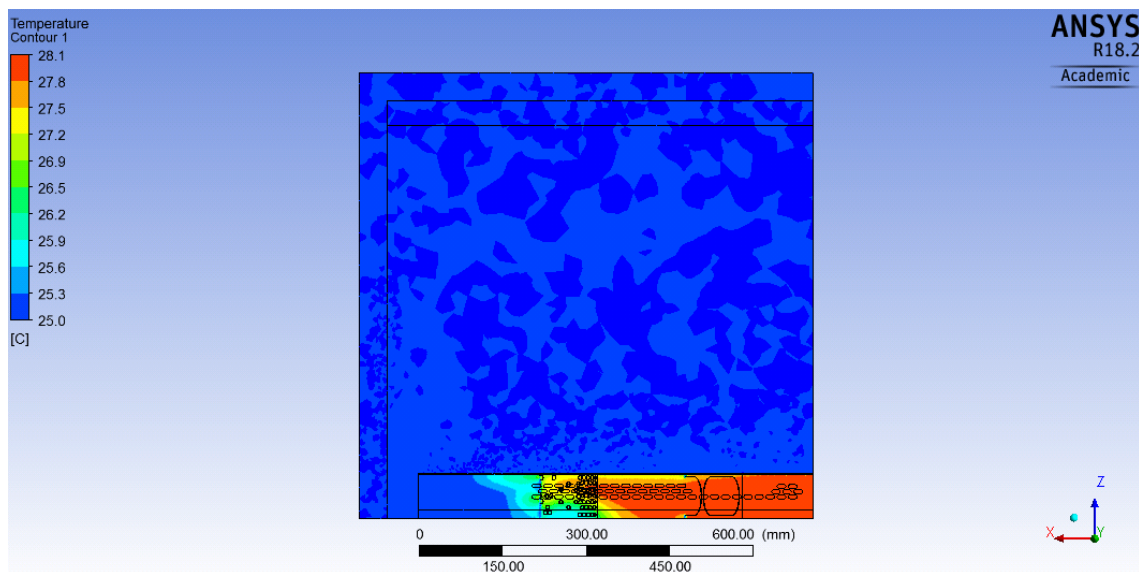


Obr. 6.23: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.

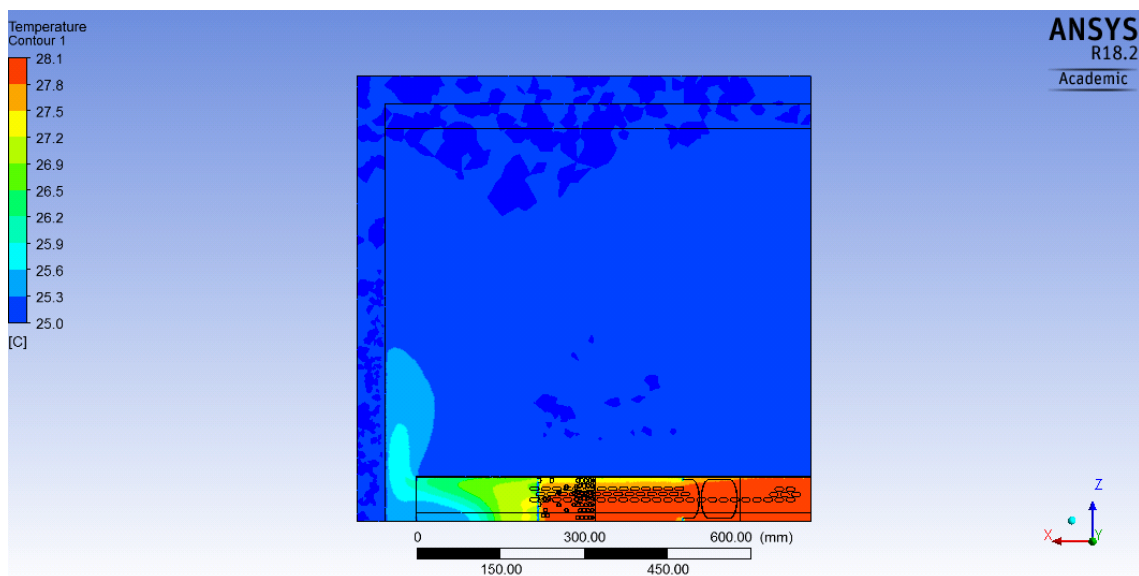


Obr. 6.24: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.

Na obrázcích 6.25 a 6.26 jsou znázorněny výsledky rozložení teploty v klimatické komoře při využití Pressure-Based, sekvenční algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Počáteční teplota je 25 °C, teplota na vstupu je 28 °C. Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu je 0,005 kg/s. Čas simulace je 12 s.

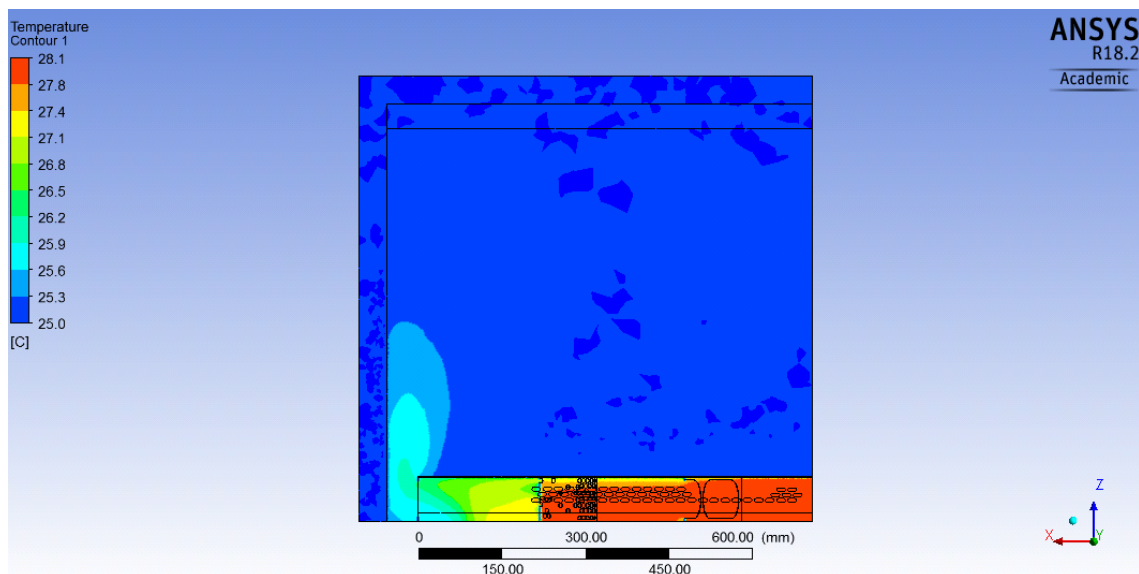


Obr. 6.25: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,005 kg/s.

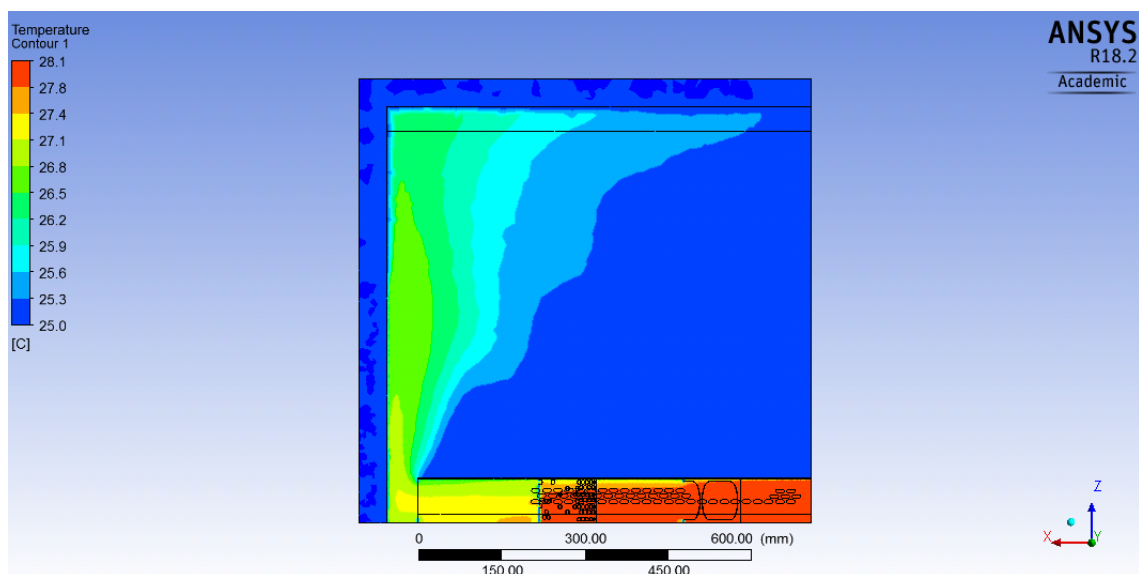


Obr. 6.26: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,005 kg/s.

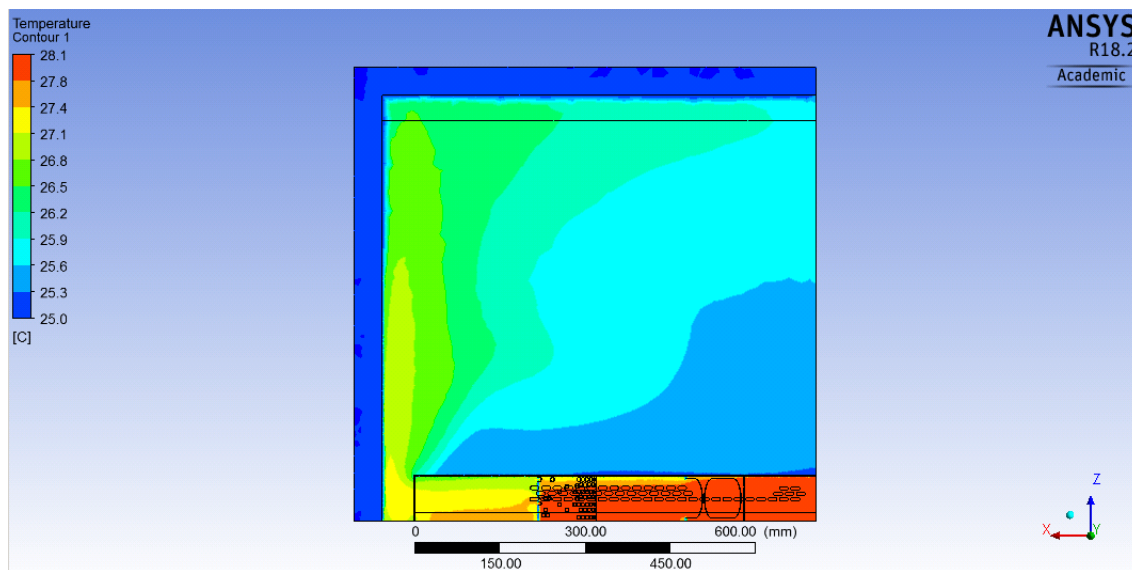
Na obrázcích 6.27 až 6.31 jsou znázorněny výsledky rozložení teploty v klimatické komoře při využití Pressure-Based, sekvenční algoritmus COUPLED s protiproudou interpolací 2. řádu. Počáteční teplota je 25 °C, teplota na vstupu je 28 °C. Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu je 0,01 kg/s. Čas simulace je 60 s.



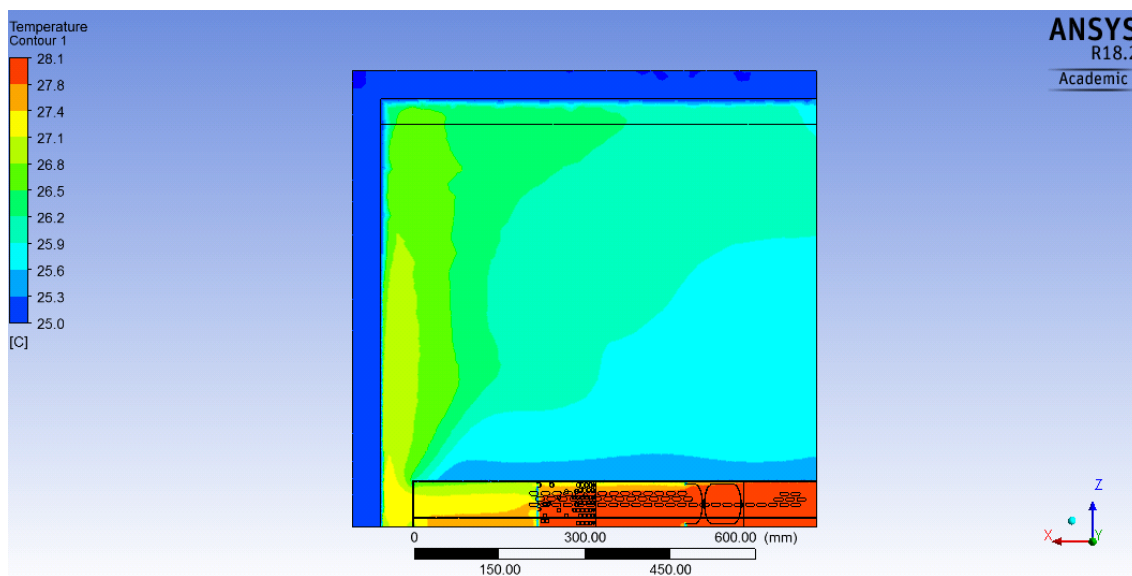
Obr. 6.27: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



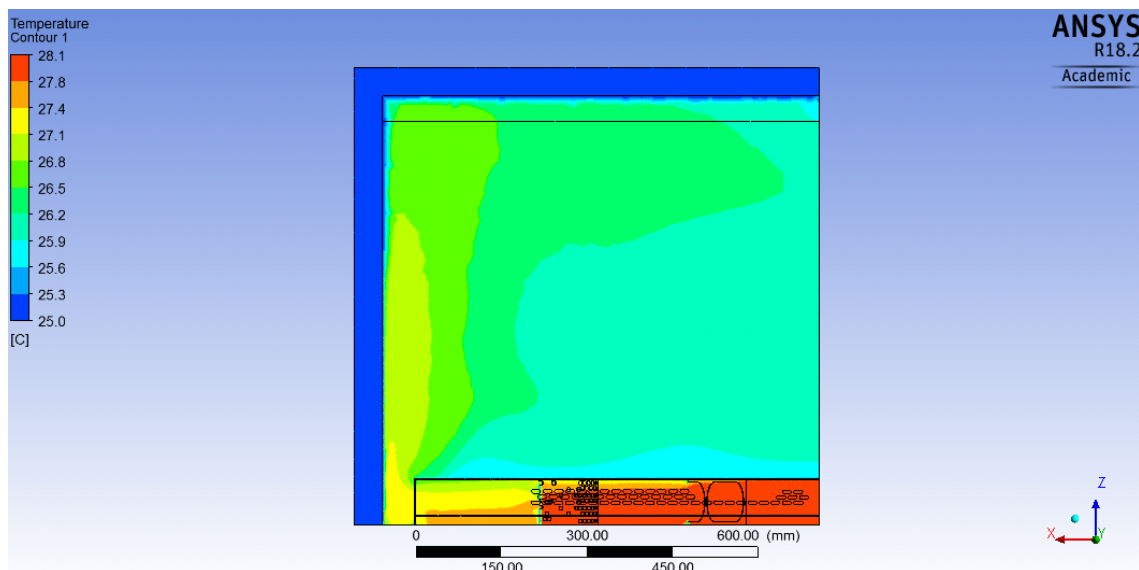
Obr. 6.28: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



Obr. 6.29: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



Obr. 6.30: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 50 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



Obr. 6.31: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 60 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.

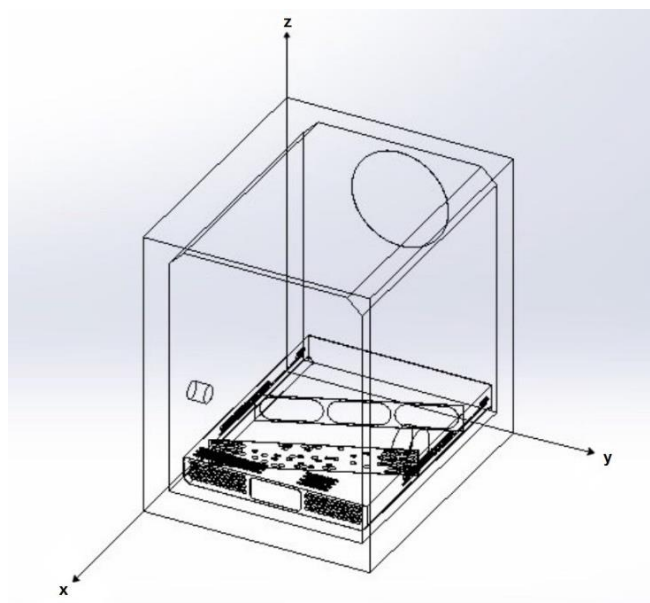
Výsledky simulace ukázaly, že při hmotnostních průtocích vzduchu 0,001 kg/s a 0,005 kg/s nedocházelo k výrazným změnám teploty v pracovním prostoru klimatické komory, za výjimkou prostoru pod spodním plechem komory, proto tyto simulace byly zastaveny. Při hmotnostním průtoku vzduchu 0,01 kg/s je vidět, že tento průtok je nejvhodnější. Za 60 sekund došlo ke změnám teploty v celém pracovním prostoru klimatické komory. Z toho plyne, že hodnota hmotnostního průtoku vzduchu 0,01 kg/s je vyhovující pro časovou analýzu rozložení teploty v klimatické komoře.

6.2 Měření teplotního profilu v klimatické komoře

Měření probíhalo ve společnosti Honeywell s.r.o. Úkolem je změřit teplotní profil v klimatické komoře. Počáteční teplota je 25 °C, konečná teplota je 85 °C. Výrobce klimatické komory uvádí rychlost změny teploty během ohřevu 3,2 K/1 min dle IEC 60068-3-5, odchylka teplotní homogenity v pracovním prostoru je $\pm 0,5$ K až $\pm 1,5$ K.

Koordináty umístění článků jsou dle soustavy souřadnic (obrázek 6.32):

- Etalon č. 1 [150, 340, 500],
- Etalon č. 2 [150, 615, 500],
- Termočlánek č. 1 [755, 625, 140],
- Termočlánek č. 2 [755, 55, 140],
- Termočlánek č. 3 [100, 620, 790],
- Termočlánek č. 4 [655, 620, 790],
- Termočlánek č. 5 [383, 580, 425],

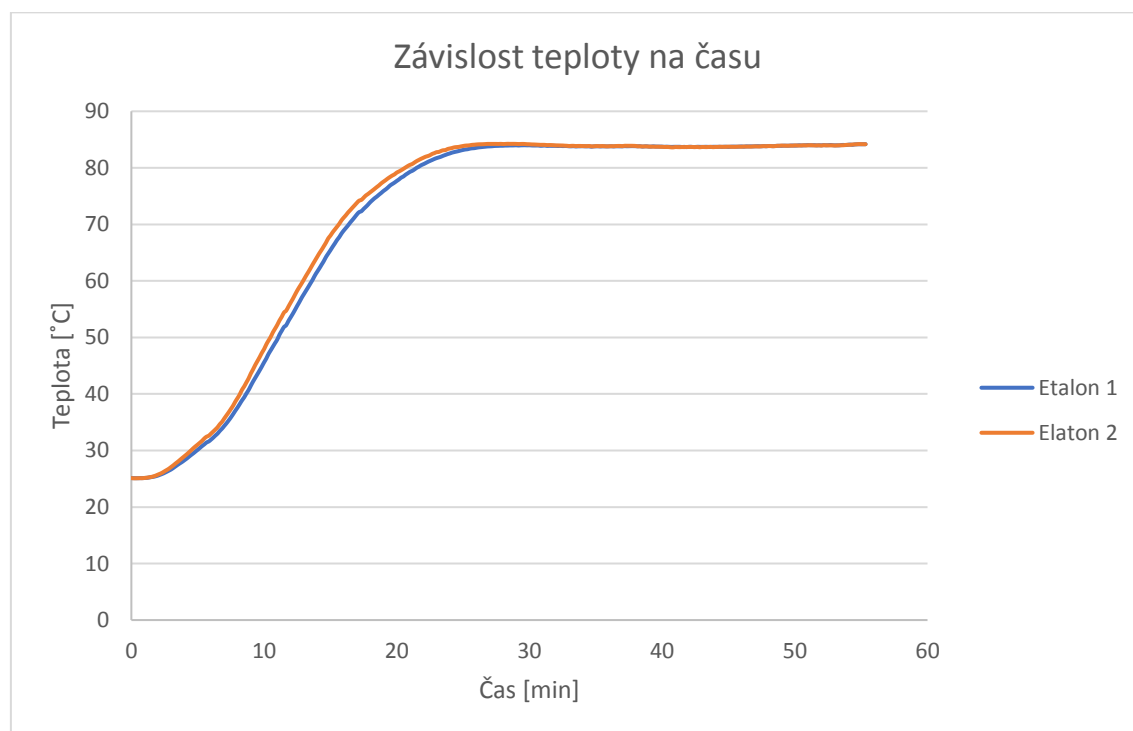


Obr. 6.32: Soustava souřadnic modelu klimatické komory

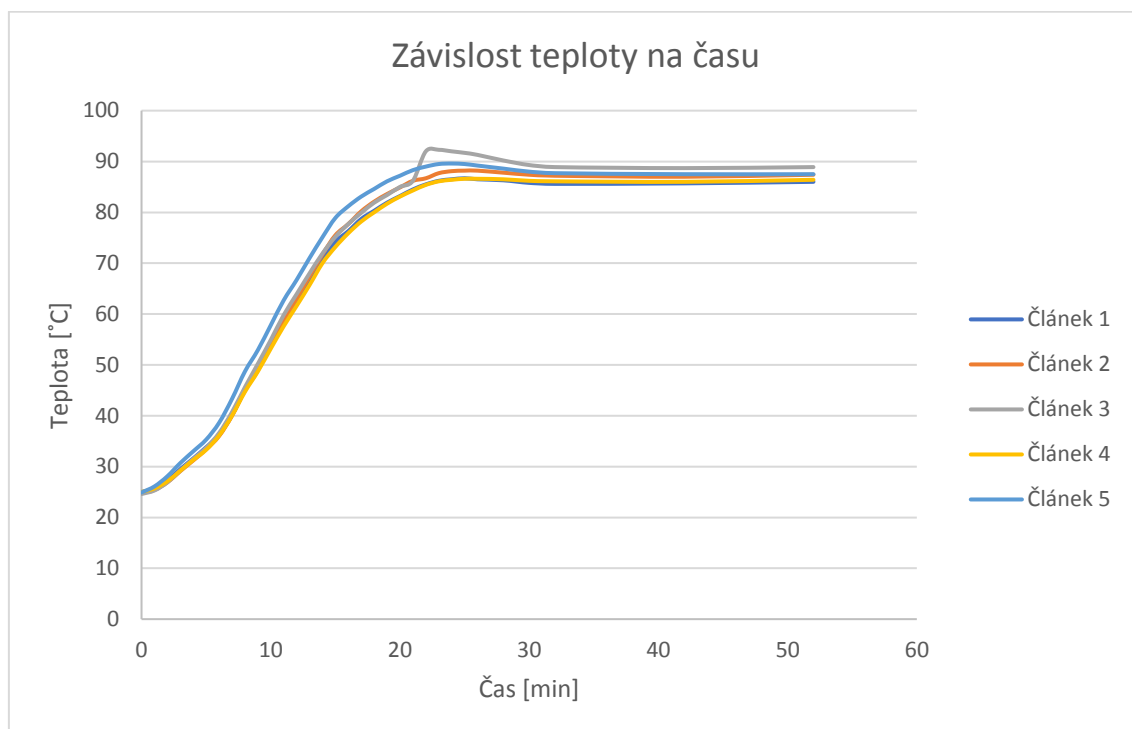
Etalonové články jsou Rotronic 8303 Bassersdorf (ART NO: HP23-A, SERIE NO: 60957647).

Změřené hodnoty byly následovně vyneseny do grafů. Tabulka se změřenými hodnotami je uvedena v seznamu příloh.

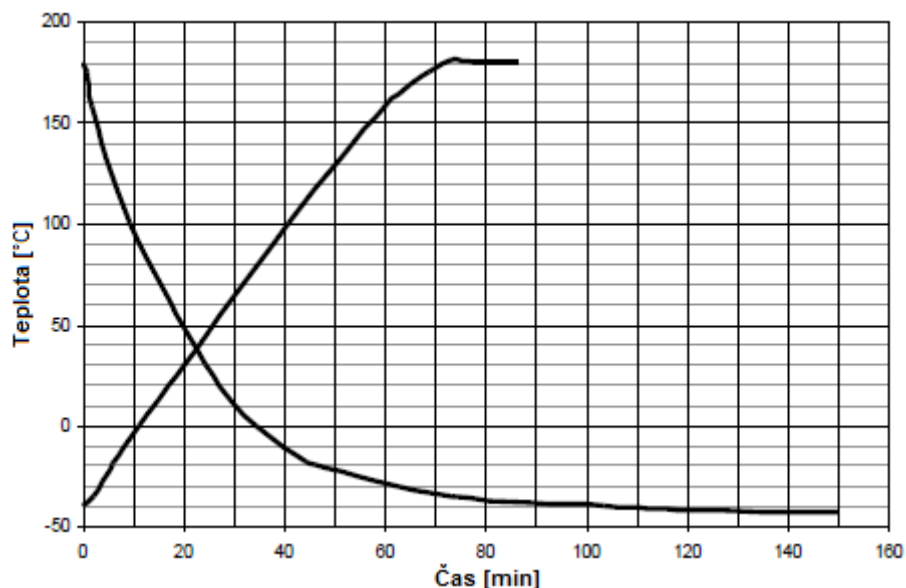
Graf č.1: Teplotní profily z naměřených hodnot pomocí etalonových článků.



Graf č.2: Teplotní profily z naměřených hodnot pomocí termočlánků.



Z naměřených hodnot lze konstatovat, že v poloze, kde byly umístěny etalonové články, docházelo k pomalejší změně teploty na rozdíl od polohy termočlánků. Také to mohlo být způsobeno tím, že etalonové články, na rozdíl od termočlánků, mají pomalejší reakci na změnu teploty uvnitř pracovního prostoru. Změřené teplotní profily odpovídají teplotnímu profilu, který udává výrobce klimatické komory, viz obrázek 6.33:



Obr. 6.33: Teplotní profily ohřevu a chlazení klimatické komory Weiss WK 340 [21]

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá matematicko-fyzikální analýzou klimatické komory.

V teoretické části práce je popsán princip klimatické komory, a jsou uvedeny procesy, které probíhají při změně stavu vzduchu. Následuje popis 3D CAD systému SolidWorks a ANSYS Fluentu. Systém SolidWorks sloužil k vymodelování 3D modelu klimatické Weiss WK3-340/40. Pomocí systému ANSYS Fluent byly provedeny analýzy. Práce se dále zabývá rovnicemi kontinuity, energie a Navier-Stokesovými rovnicemi, diskretizací, metodou konečných objemů, interpolačními schémata, metodami řešení úloh v ANSYS Fluent, turbulencí a matematickými modely turbulentního proudění.

Výsledky získané analýzami pomocí systému ANSYS Fuent prokázaly, že hodnota hmotnostního průtoku vzduchu 0,01 kg/s je neoptimálnější hodnotou, při které dochází k dostatečnému rozložení proudění vzduchu v celém pracovním prostoru klimatické komory v ustáleném stavu. Takže tato hodnota je vyhovující pro časovou analýzu rozložení teploty v klimatické komoře. Při níž dochází k výrazným změnám teploty v celém pracovním prostoru. Při dalších simulacích by bylo vhodné používat již větší hodnotu hmotnostního průtoku vzduchu nebo uvažovat o změnách konstrukce spodního plechu, který výrazně ovlivňuje rozložení rychlosti proudění v celém pracovním prostoru klimatické komory.

Závěrem práce jsou zobrazeny jednotlivé výsledky simulací, které zobrazují vektorové rozložení rychlosti v ustáleném stavu s detailním pohledem na oblast spodního plechu pracovního prostoru, rozložení rychlosti proudění v ustáleném stavu s detailním pohledem na oblast spodního plechu pracovního prostoru, rozložení teploty v klimatické komoře v závislosti na hmotnostním průtoku vzduchu a času a grafy zobrazující změřené teplotní profily klimatické komory.

LITERATURA

- [1] NOVÁK, P. *Konstrukce klimatické komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 75 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Frýza.
- [2] LIEDERMANN, K.; POLSTEROVÁ, H.; ROZSÍVALOVÁ, Z. *Klimatotechnologie*, Brno: VUT v Brně, FEKT.
- [3] Univerzální teplotní a klimatické komory WT3/WK3. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/zkusebni-komory/teplotni-a-klimatizacni/univerzalni-teplotni-a-klimaticke-komory-wt3-wk3.html>
- [4] Zkušební teplotní šoková skříň – Elektrotechnický zkušební ústav, s.p. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://ezu.cz/o-nas/vybaveni-laboratori/zkusebni-teplotni-sokova-skrin/>
- [5] Vibrační systémy. LABTECH. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.labtech.eu/vibracni-systemy/>
- [6] Korozní komory. ASCOTT. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.ascott.cz/czech_2.html
- [7] Walk-in velké komory. HOLAB. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://holab.cz/produkty/klimaticke-teplotni-a-korozni-komory/walk-in-velke-komory>
- [8] Teorie vlhkého vzduchu (III). Tzbinfo [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3382-teorie-vlhkeho-vzduchu-iii>
- [9] DRKAL, F., LAIN M., SCHWARZER J., ZMRHAL., V. *Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika*, Praha 2009: ČVUT.
- [10] Encyklopedie fyziky. Peltierův jev. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [11] Farmaceutické sušárny. BMT. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz/farmaceuticke-susarny>
- [12] FAZEKAS, T. *Využití programu SolidWorks v silnoproudé elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Veselka, CSc
- [13] BÍLEK, M. *Analýza tvaru sacích kanálů současné koncepce diferenciálně čerpané komory*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 80 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D
- [14] DRÁBKOVÁ, S. A KOL.: *Mechanika tekutin*. VŠB-TU : Ostrava, 2007.
- [15] Energetické fórum. Klimatická komora. [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/klimaticka-komora>
- [16] VLČEK, P. *Modelování turbulentního proudění*. České vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní.
- [17] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. VŠB – TU. Ostrava, 2008.
- [18] ZÁCHA, P. *Fluent: Přednášky*. Praha, 2014. Učební text. České vysoké učení technické v Praze

- [19] BEDNÁŘ, E. Analýza vlivu proudění plynu v oblasti umístění vzorku v komoře enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 112 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [20] MAXA, J, P VYROUBAL a V NEDĚLA. Řízení a správa dat. Brno, 2015. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] Climate Test Chamber System Type WK3-340/40. [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.buch-holm.dk/Perfion/File.aspx?id=13e2ebb3-7b16-45ba-b649-16c5cfa77750>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

C	(m.s^{-1})	rychlost zvuku
d	(m)	průměr
e	(J)	vnitřní energie
ij	-	indexy u veličin udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).
k	(J)	kinetická energie
l	(m)	Střední volná dráha molekuly
M	-	Machovo číslo
p	Pa	statický tlak
QH	(J.m^{-3})	přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu
q_i	(m^2K)	tok tepla difusí
R	-	všeobecná plynová konstanta
Re	-	Reynoldsovo číslo
T	K	teplota plynu
T_t	(s)	časové měřítko přenosu turbulentních vírů
T_v	(s)	časové měřítko molekulární difúze
u	(m.s^{-1})	rychlostní měřítko
v, u	(m.s^{-1})	rychlost tekutiny
v_s	(m.s^{-1})	střední rychlost v potrubí
x_k	(m)	vzdálenost od náběžné hrany, ve které laminární mezní vrstva přechází do turbulentní
κ	-	Poissonova konstanta
μt	(Pa.s)	turbulentní viskozita
ρ	(kg.m^{-3})	hustota plynu
ε	$(\text{m}^2\text{s}^{-3})$	rychlost disipace (pro jednotku hmotnosti)
η	(m)	Kolmogorovovo měřítko
ν	$(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$	kinematická viskozita
σ_T	m^2	celkový zachytný průřez
n_L	m^{-3}	koncentrace molekul plynu v klimatické komoře

n_H	m^{-3}	koncentrace molekul plynu v komoře vzorku
L	m	délka letu molekuly mezi srážkami v klimatické komoře
H	m	délka letu molekuly mezi srážkami v komoře vzorku
z	-	průměrný počet srážek
n_0	-	koncentrace molekul
x	-	počet srážek

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Pracovní schéma klimatické komory.....	9
Obr. 1.2: Klimatická komora Weiss WK3-340/40 [3].....	10
Obr. 1.3: Solná korozní komora [6].....	11
Obr. 1.4: Walk-in komora [7]	12
Obr. 1.5: Drive-in komora VUT v Brně FSI [15]	12
Obr. 1.6: Průběh změny stavu vzduchu při ohřevu vzduchu [8]	13
Obr. 1.7: Průběh změny stavu vzduchu při chlazení [8].....	14
Obr. 1.8: Schématické znázornění Petlierova článku [10].....	16
Obr. 1.9: Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vzduchu [8].....	17
Obr. 1.10: Komora s přirozenou cirkulací vzduchu [11].....	19
Obr. 1.11: Komora s nucenou cirkulací vzduchu [11].....	20
Obr. 3.1: Rychlostní profily pro proudění [14].....	23
Obr. 3.2: Schéma modelů turbulence [17].....	27
Obr. 3.3: Způsoby modelování proudění v blízkosti stěny [18]	31
Obr. 4.1: Diskretizace na konečný počet objemů [16]	32
Obr. 4.2: Princip výpočetní sítě [13].....	33
Obr. 4.3: Používané prvky metody konečných objemů [16]	33
Obr. 4.4: Schéma iteračního cyklu [15].....	34
Obr. 5.1: Sekvenční algoritmus Pressure-Based [19]	37
Obr. 5.2: Pressure-Based sdružený algoritmus [19]	38
Obr. 5.3: Algoritmus Density-Based solveru [19].....	39
Obr. 6.1: Řez modelem klimatické komory Weiss WK 340.	40
Obr. 6.2: Vymodelovaný prostor klimatické komory. Pohled ze zadní strany	40
Obr. 6.3: Vymodelovaný spodní plech pracovního prostoru.....	41
Obr. 6.4: Výpočetní síť.....	42
Obr. 6.5: Detail výpočetní sítě.....	42
Obr. 6.6: Rovina v ose XZ ve středu pracovního prostoru	44
Obr. 6.7: Rovina v ose XY uprostřed spodního plechu pracovního prostoru.....	44
Obr. 6.8: Rovina v ose XZ ve středu mezi bočními stěny komory a spodního plechu..	45
Obr. 6.9: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře.....	45
Obr. 6.10: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře.	46
Obr. 6.11: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část.	46

Obr. 6.12: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část.....	47
Obr. 6.13: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část. Detail.	47
Obr. 6.14: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočnými stěny komory a spodního plechu.....	48
Obr. 6.15: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře.....	48
Obr. 6.16: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře.	49
Obr. 6.17: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část.....	49
Obr. 6.18: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část.....	50
Obr. 6.19: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Spodní část. Detail.	50
Obr. 6.20: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočnými stěny komory a spodního plechu.....	51
Obr. 6.21: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s	52
Obr. 6.22: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.	52
Obr. 6.23: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.	53
Obr. 6.24: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.	53
Obr. 6.25: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,005 kg/s.	54
Obr. 6.26: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,005 kg/s.	54
Obr. 6.27: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	55
Obr. 6.28: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	55
Obr. 6.29: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	56
Obr. 6.30: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 50 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	56
Obr. 6.31: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 60 s. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	57
Obr. 6.32: Soustava souřadnic modelu klimatické komory.....	58
Obr. 6.33: Teplotní profily ohřevu a chlazení klimatické komory Weiss WK 340 [21]	59

Přílohy:

Obrázek 1: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu 0,001 kg/s.	69
--	----

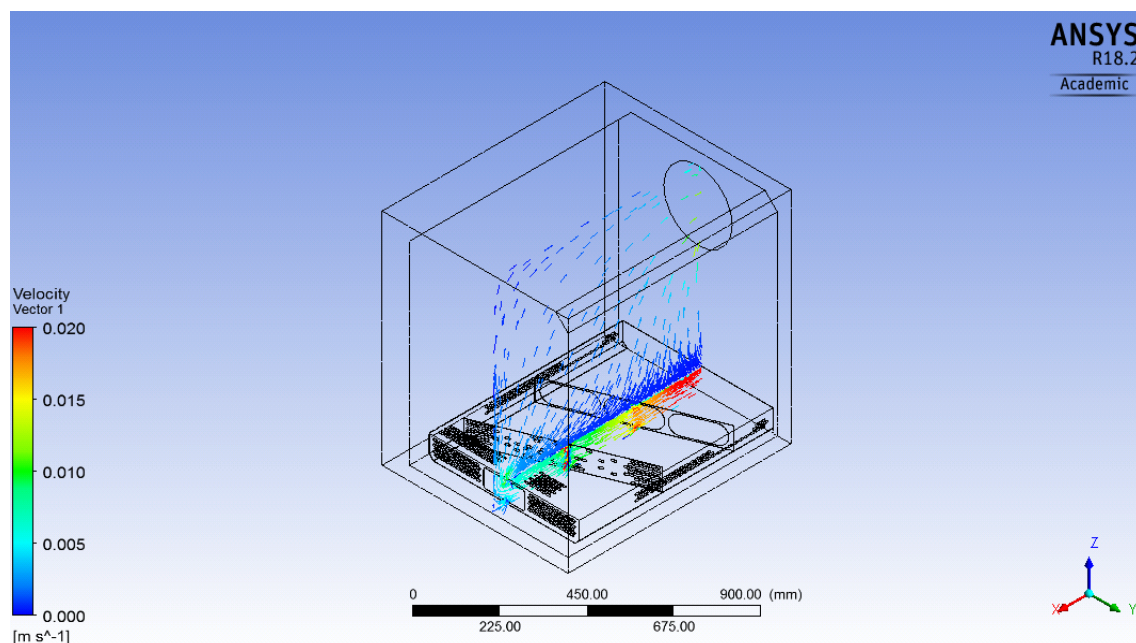
Obrázek 2: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.	69
Obrázek 3: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočnými stěny komory a spodního plechu. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok je 0,001 kg/s.	70
Obrázek 4: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	70
Obrázek 5: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.	71
Obrázek 6: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočnými stěny komory a spodního plechu. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok je 0,01 kg/s.	71
Obrázek 7: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s. 0,001 kg/s	72
Obrázek 8: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	72
Obrázek 9: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	73
Obrázek 10: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 18 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	73
Obrázek 11: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 24 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	74
Obrázek 12: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	74
Obrázek 13: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 36 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.	75
Obrázek 14: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	75
Obrázek 15: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 10 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	76
Obrázek 16: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 20 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	76
Obrázek 17: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	77
Obrázek 18: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 40 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	77
Obrázek 19: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 50 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	78
Obrázek 20: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 60 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.	78

SEZNAM PŘÍLOH

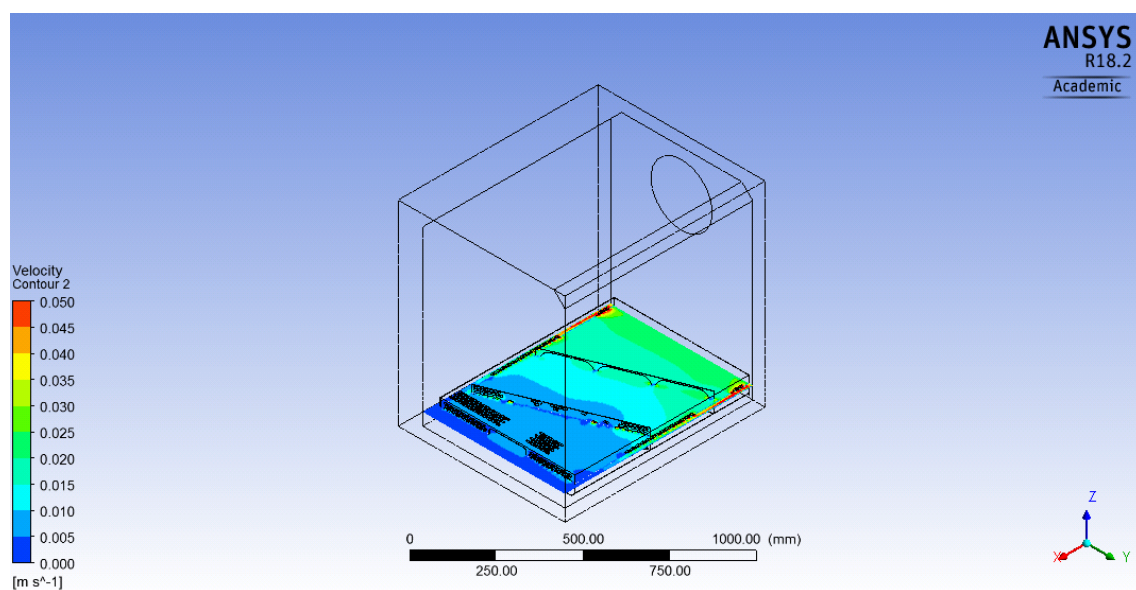
Přílohou práce je CD s elektronickou verzí diplomové práce.

Tab. 1: Teploty na termočláncích. Měření teplotního profilu.

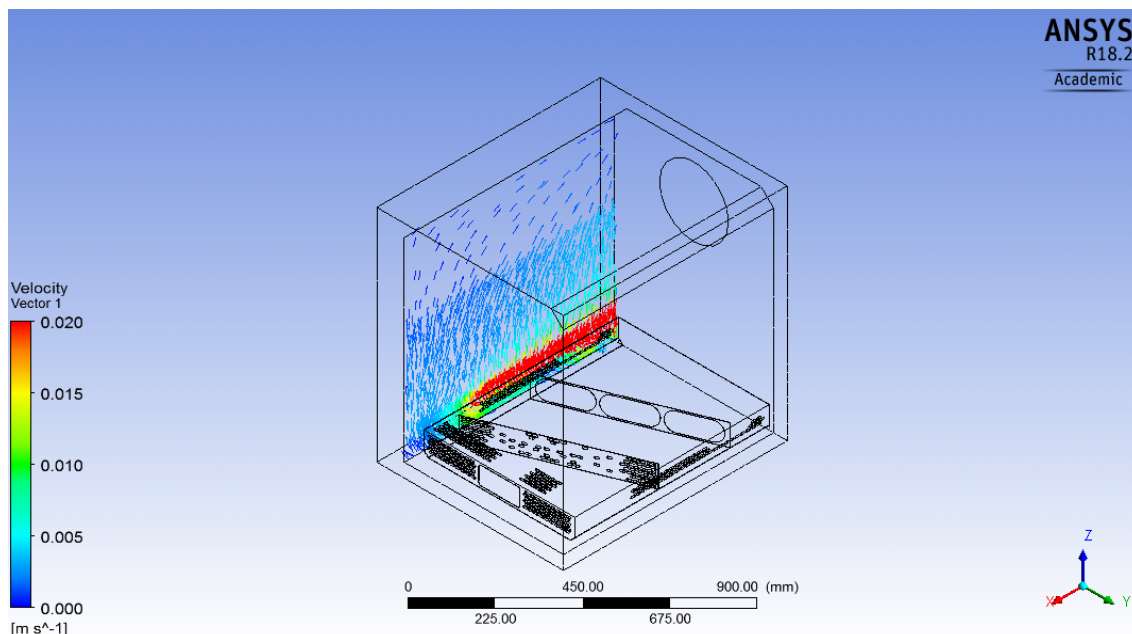
Čas [min]	Tč. 1 [°C]	Tč. 2 [°C]	Tč. 3 [°C]	Tč. 4 [°C]	Tč. 5 [°C]	Et. 1 [°C]	Et. 2 [°C]
0	25	24,8	24,6	25	24,9	25,12	25,11
1	25,6	25,4	25,3	25,7	26,1	25,14	25,14
2	27,2	26,9	26,9	27,1	28,1	25,56	25,73
3	29,5	29,1	29,2	29,2	30,7	26,65	27,09
4	31,6	31,2	31,5	31,3	33	28,28	28,99
5	33,8	33,4	33,7	33,3	35,3	30,13	31,05
6	36,2	36	36,6	36,1	38,6	31,92	32,98
7	40,1	40	40,7	40	43,3	34,34	35,65
8	45	45	45,6	44,7	48,7	37,6	39,26
9	49,3	48,9	50,2	48,7	52,9	41,45	43,60
10	53,8	54,2	54,9	53,2	57,8	45,59	47,92
11	58,5	58,9	59,8	57,6	62,7	49,65	52,24
12	62	63	63,9	61,6	66,7	53,54	56,14
13	66,3	67,4	68	65,7	71	57,65	60,23
14	70,5	71,7	71,9	70	75,1	61,61	64,24
15	74,2	75,5	75,2	73,2	78,9	65,42	68,01
16	76,3	77,7	77,7	75,9	81,2	68,89	71,18
17	78,7	80,2	79,9	78,2	83,1	71,77	73,82
18	80,3	82,1	81,9	80	84,6	73,92	75,68
19	81,9	83,6	83,4	81,7	86,1	75,91	77,55
20	83,2	84,9	85	83,1	87,2	78,27	79,58
21	84,5	86,2	86,2	84,3	88,3	79,3	80,53
22	85,5	86,7	92	85,4	89	80,64	81,78
23	86,2	87,7	92,3	86,1	89,5	81,72	82,77
24	86,5	88,1	92	86,4	89,6	82,55	83,42
25	86,7	88,2	91,7	86,6	89,5	83,55	84,13
26	86,5	88,2	91,3	86,6	89,2	83,91	84,21
28	86,3	87,8	90,2	86,5	88,6	83,99	84,17
30	85,8	87,4	89,3	86,2	88	83,88	83,97
32	85,6	87,2	88,9	86,1	87,7	83,83	83,85
42	85,7	87	88,7	86	87,5	83,71	83,69
52	86	87,4	88,9	86,4	87,5	83,98	83,94



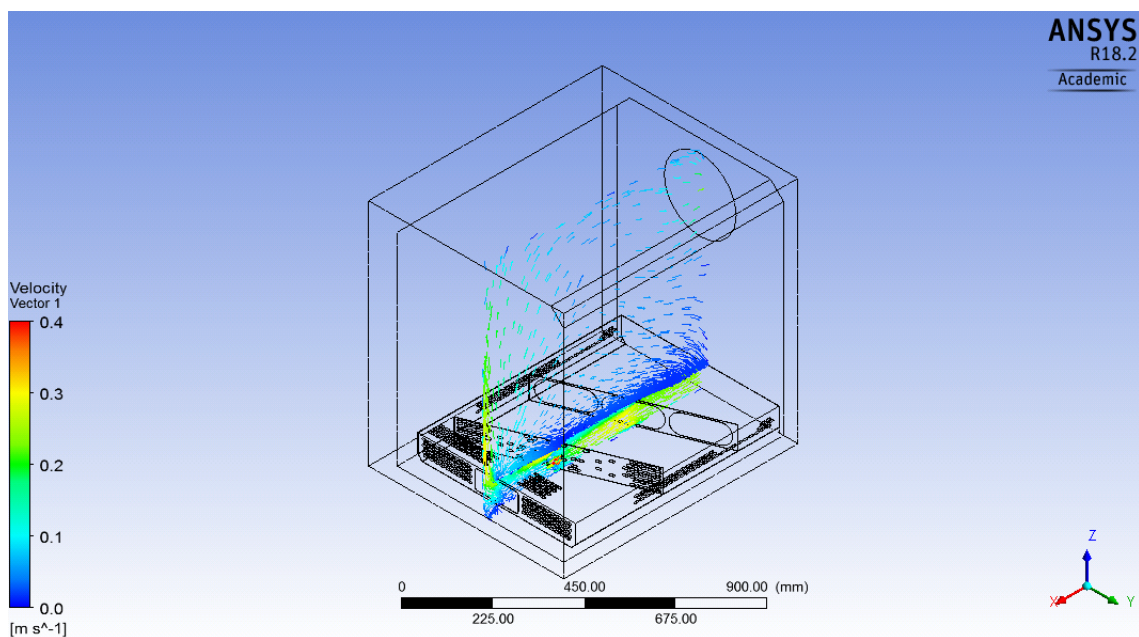
Obrázek 1: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Izometrický pohled.
Hmotnostní průtok vzduchu 0,001 kg/s.



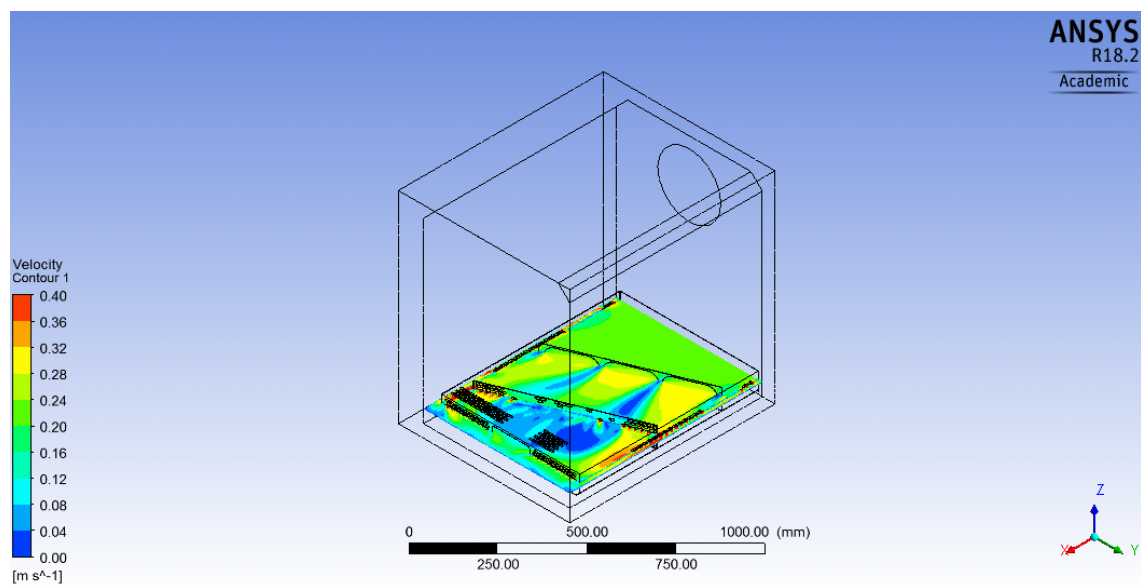
Obrázek 2: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část. Izometrický pohled.
Hmotnostní průtok vzduchu je 0,001 kg/s.



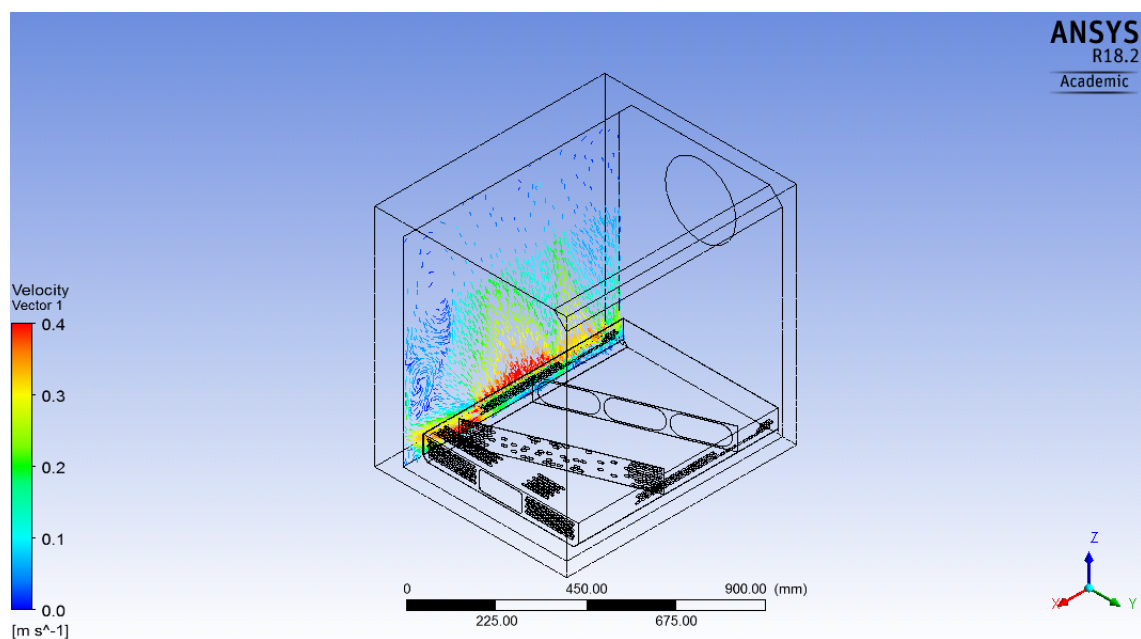
Obrázek 3: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočními stěny komory a spodního plechu. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok je 0,001 kg/s



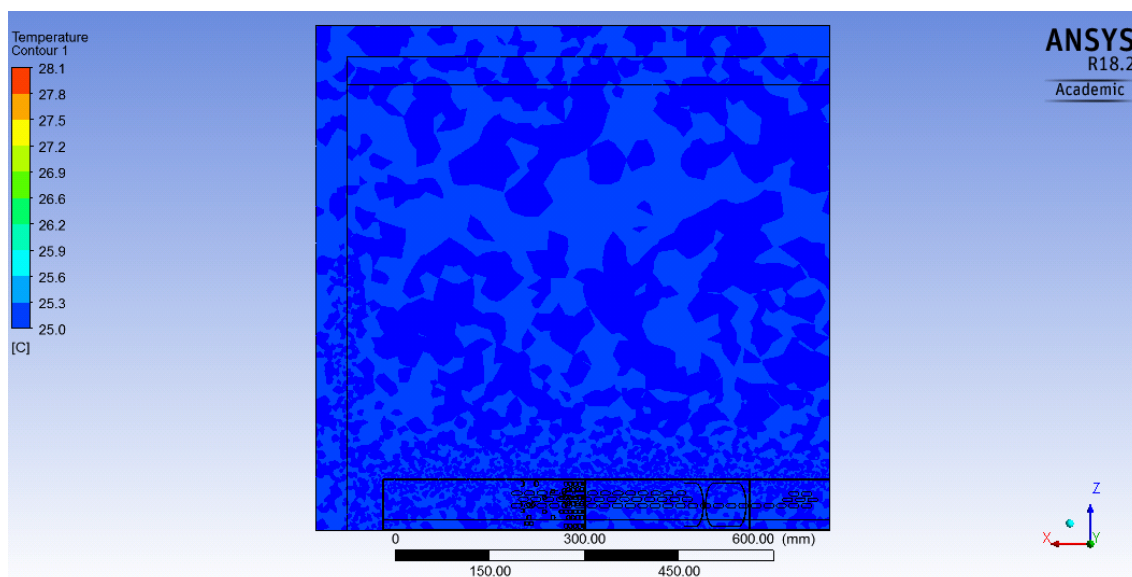
Obrázek 4: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



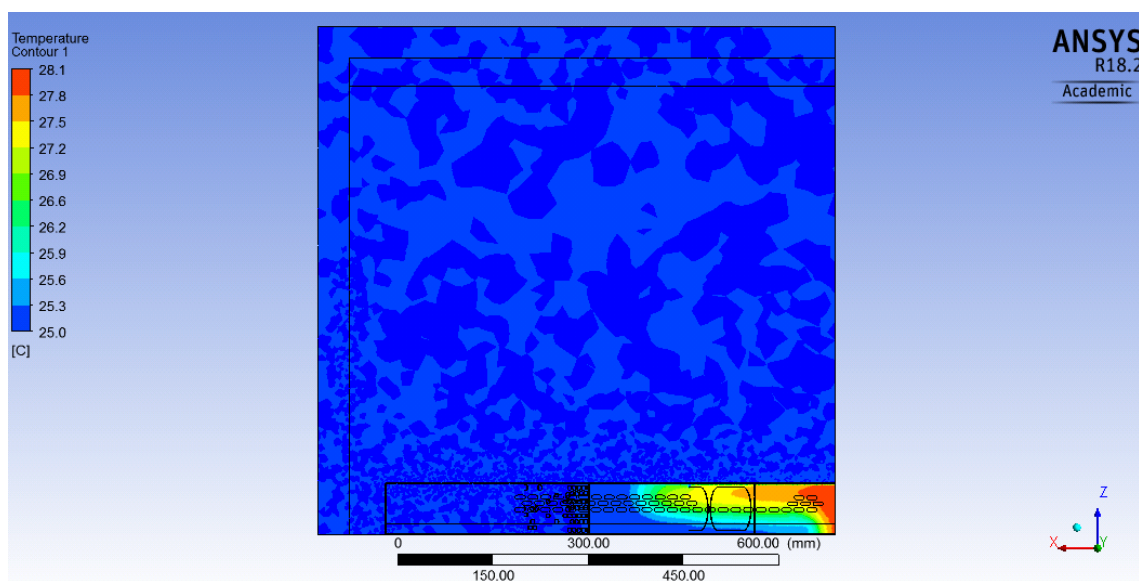
Obrázek 5: Rozložení rychlosti proudění v klimatické komoře. Spodní část. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok vzduchu je 0,01 kg/s.



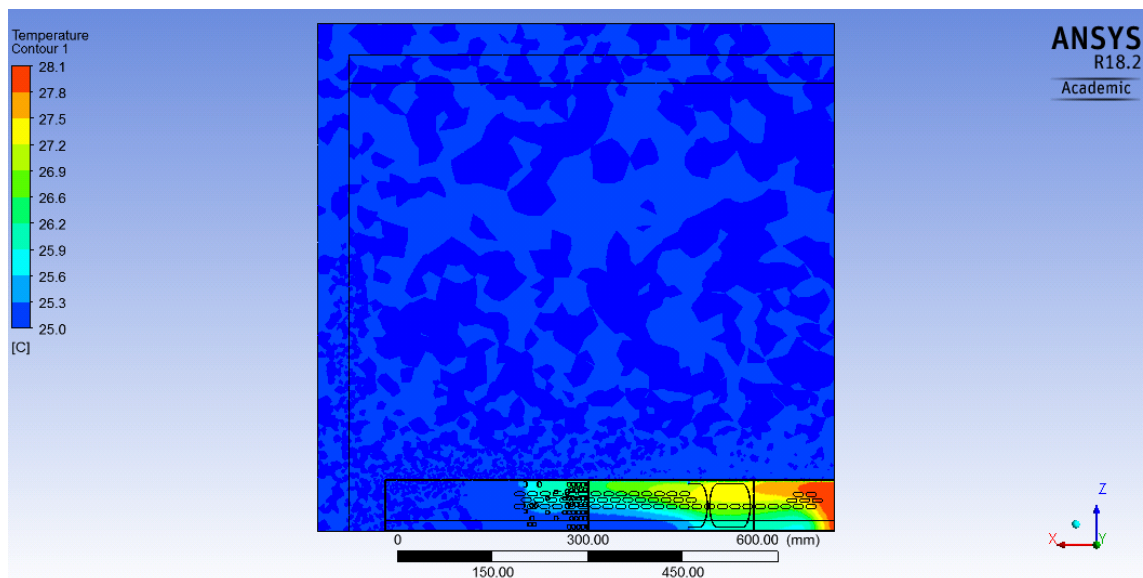
Obrázek 6: Vektorové rozložení rychlosti v klimatické komoře – Rovina mezi bočními stěny komory a spodního plechu. Izometrický pohled. Hmotnostní průtok je 0,01 kg/s.



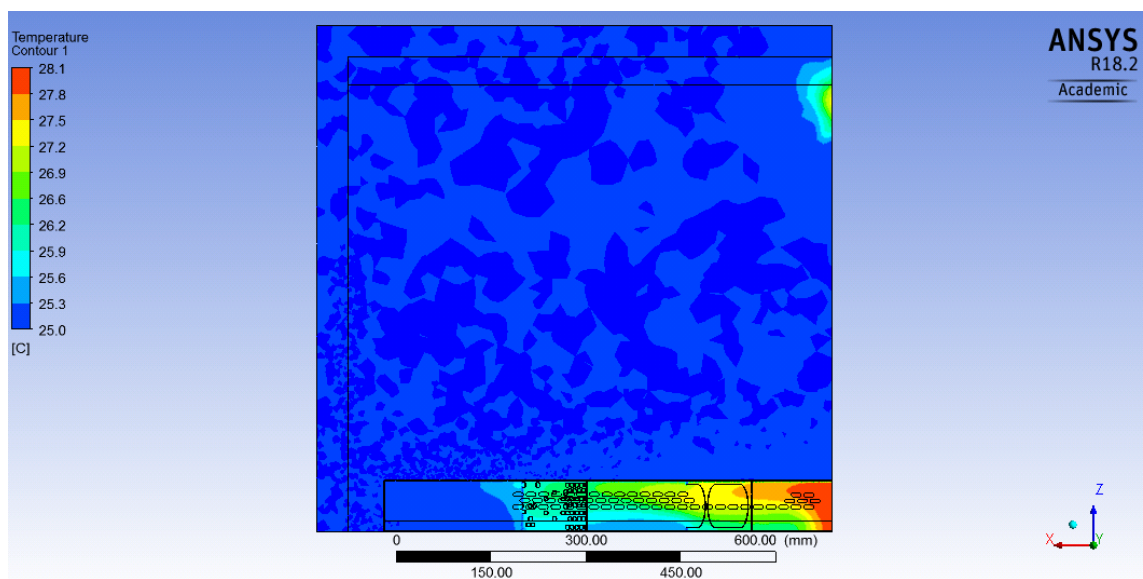
Obrázek 7: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.
0,001 kg/s



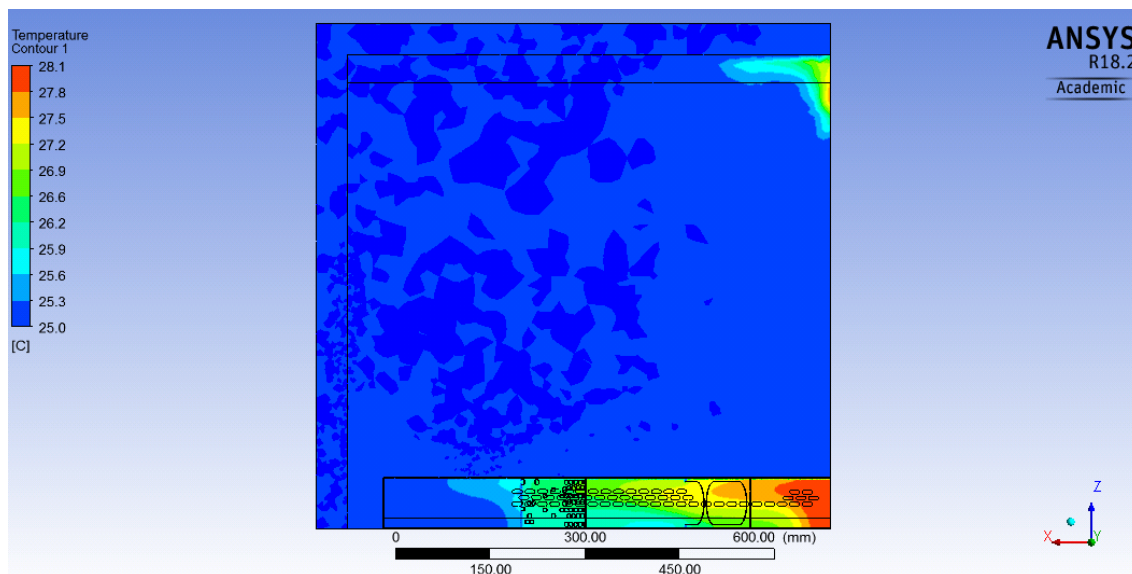
Obrázek 8: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 6 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



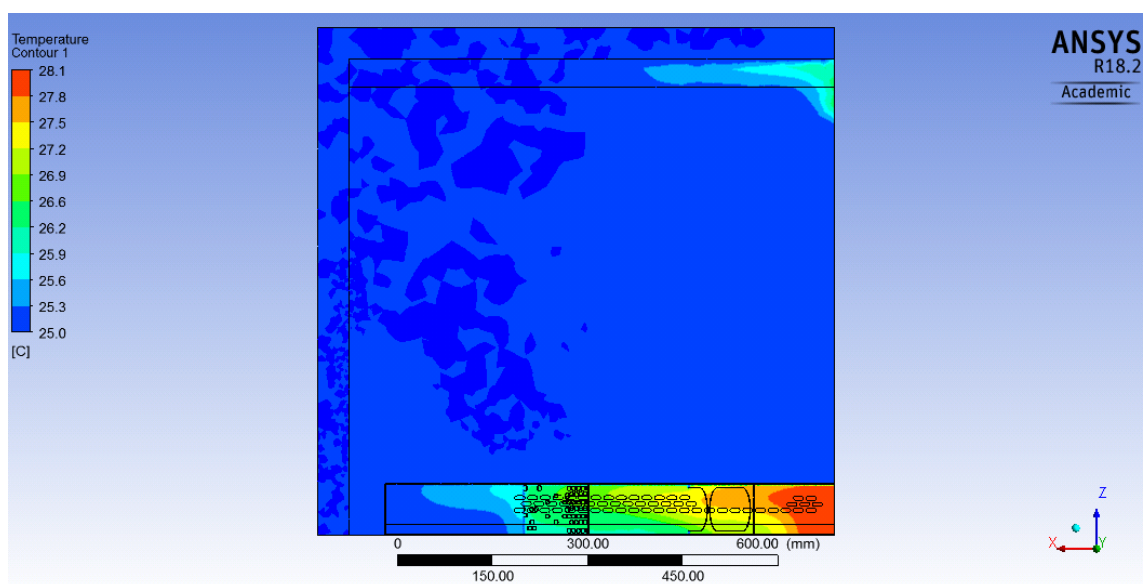
Obrázek 9: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 12 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



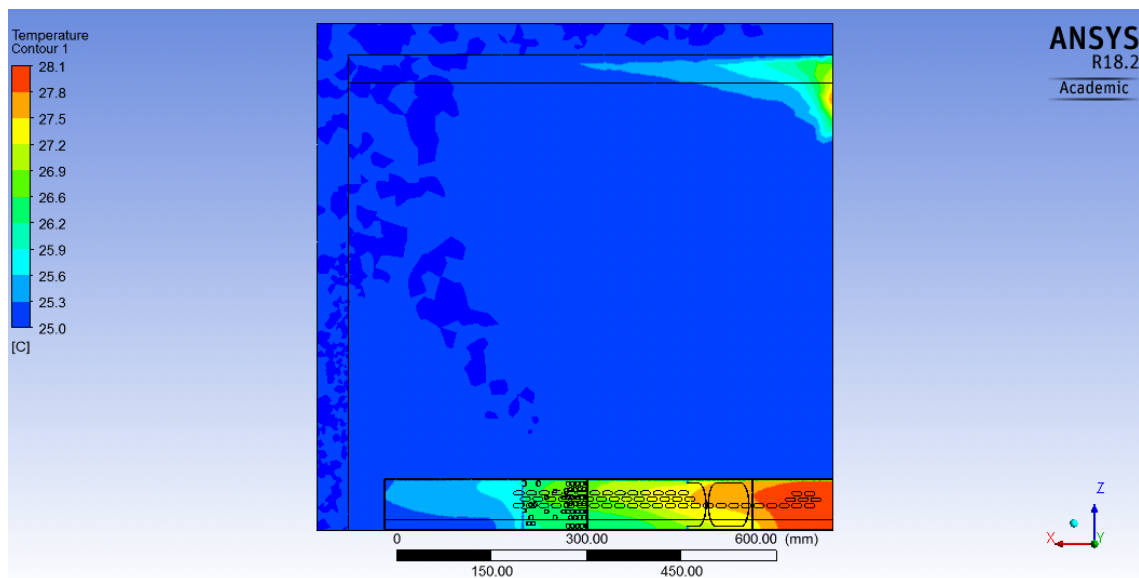
Obrázek 10: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 18 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



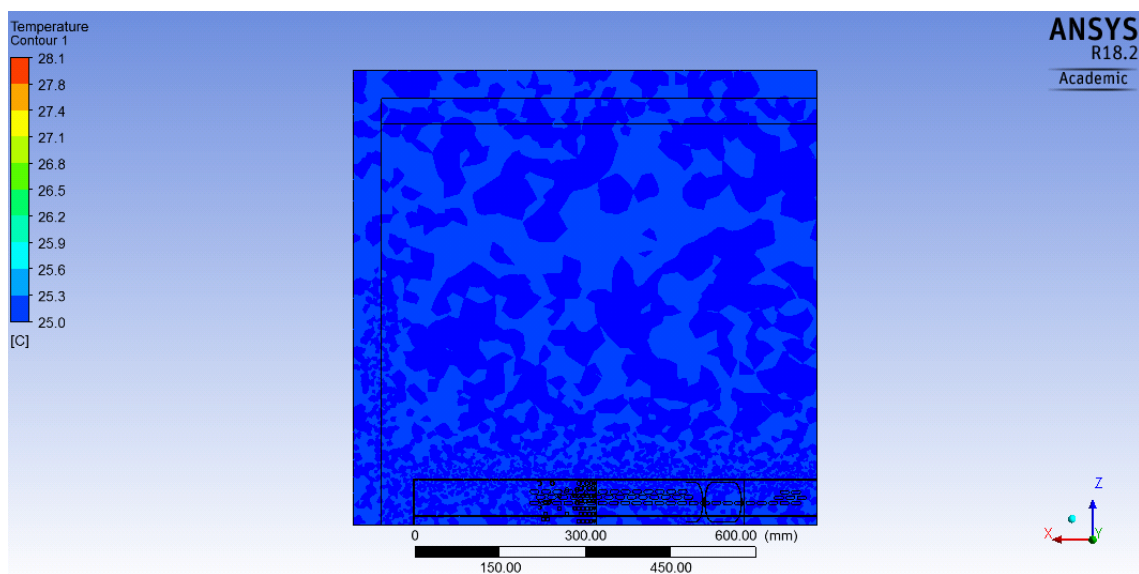
Obrázek 11: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 24 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



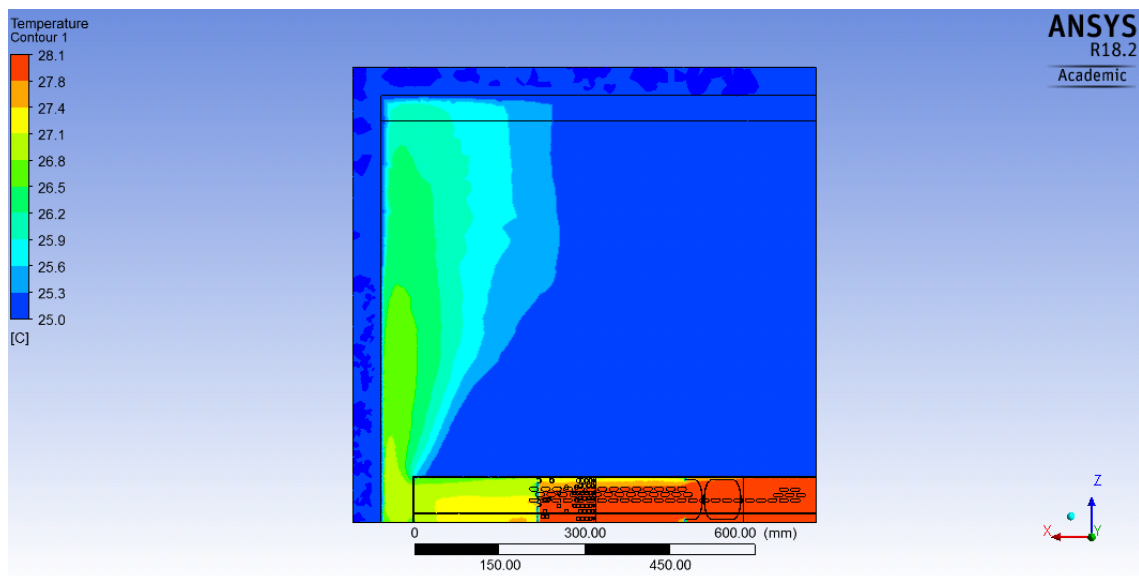
Obrázek 12: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



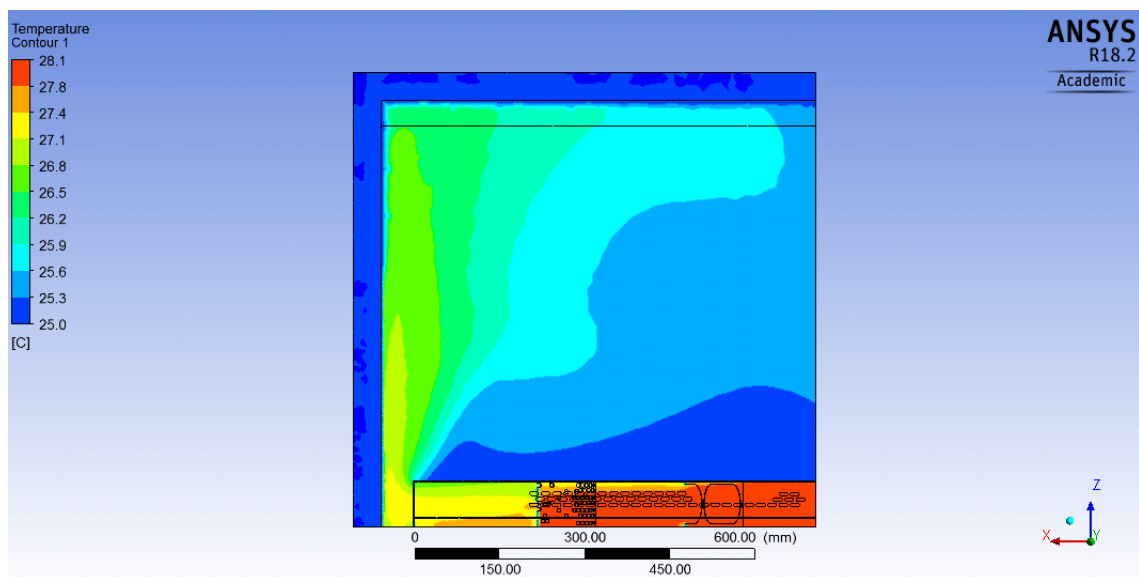
Obrázek 13: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 36 s. Hmotnostní tok je 0,001 kg/s.



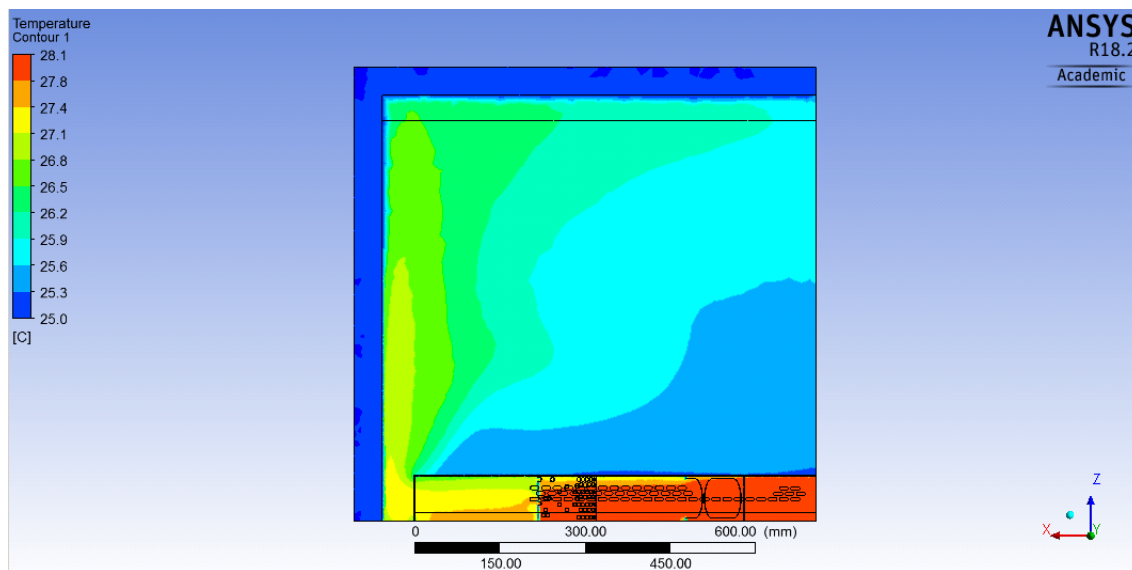
Obrázek 14: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 0 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



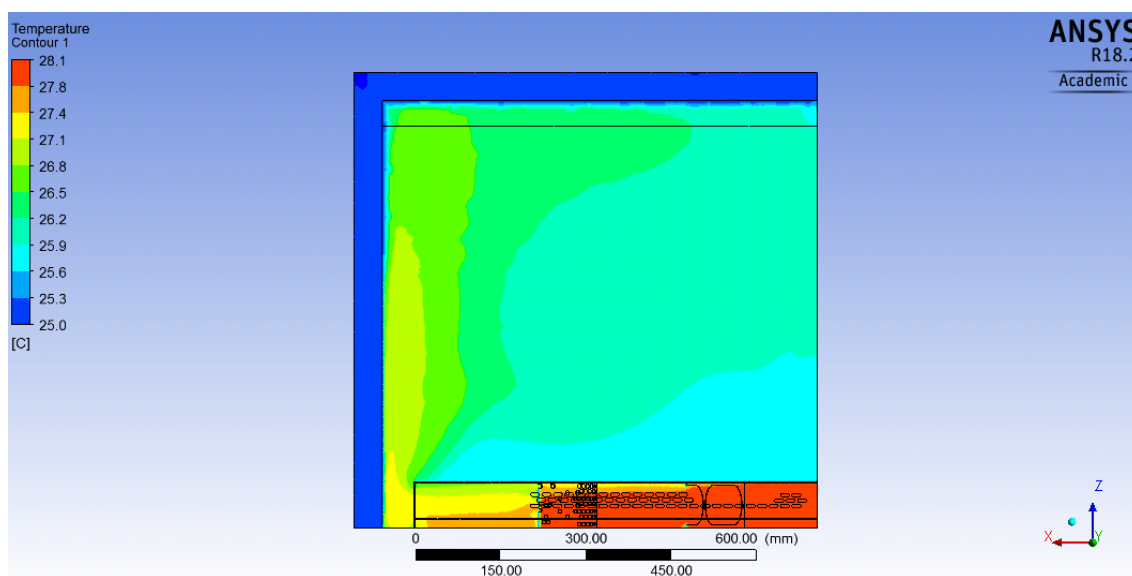
Obrázek 15: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 10 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



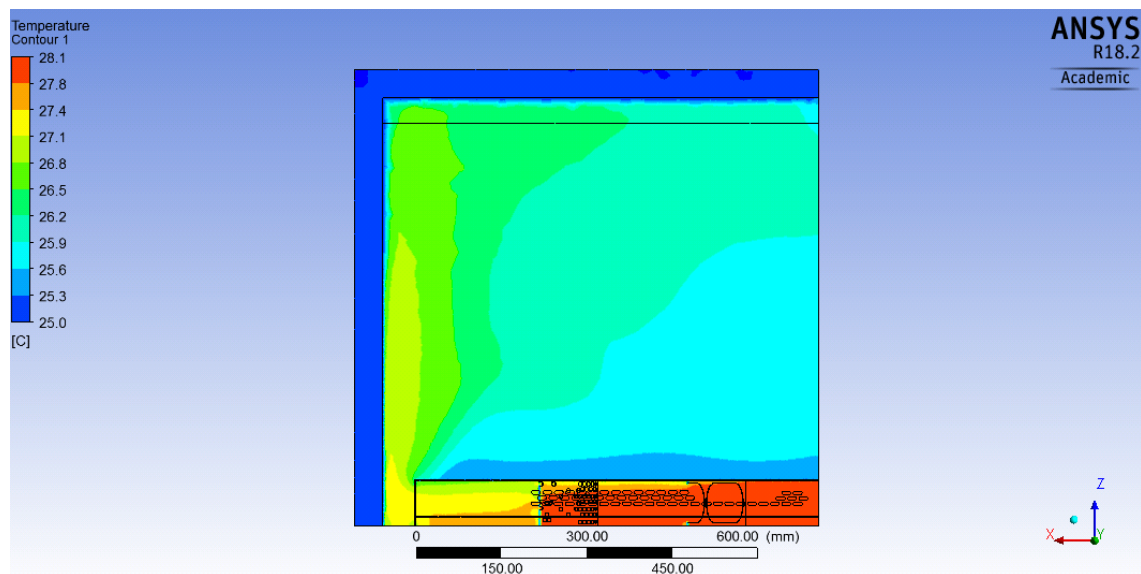
Obrázek 16: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 20 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



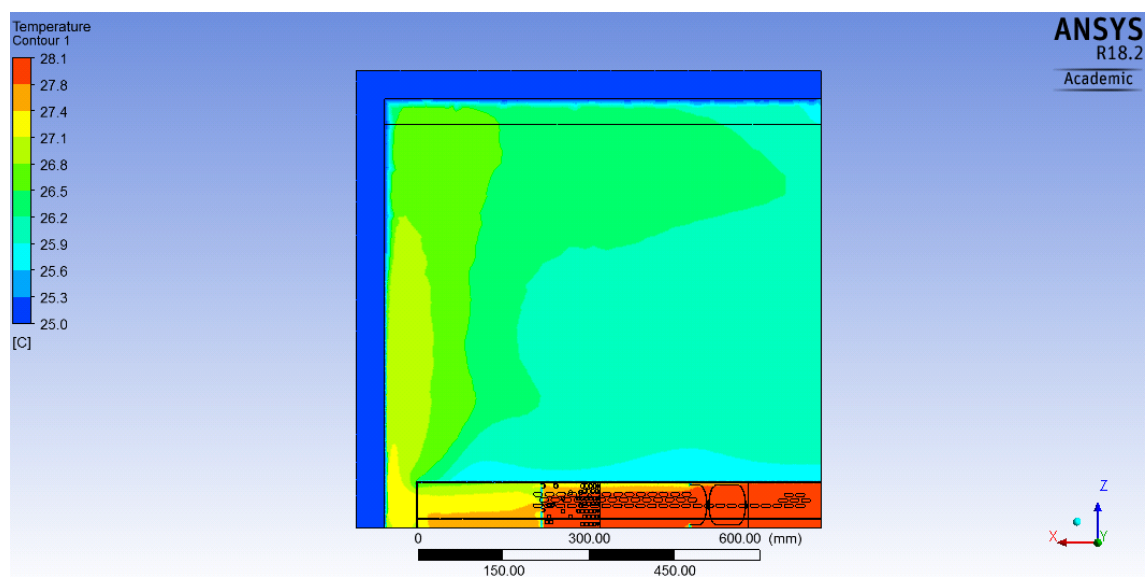
Obrázek 17: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 30 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



Obrázek 18: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 40 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



Obrázek 19: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 50 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.



Obrázek 20: Rozložení teploty v klimatické komoře v čase 60 s. Hmotnostní tok je 0,01 kg/s.